



TITLE:

結露障害防止に関する基礎的研究(
Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

池田, 哲朗

CITATION:

池田, 哲朗. 結露障害防止に関する基礎的研究. 京都大学, 1980, 工学博士

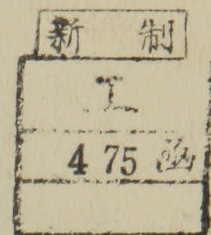
ISSUE DATE:

1980-03-24

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r4125>

RIGHT:



結露障害防止に関する基礎的研究

昭和54年10月

池田哲朗

結露障害防止に関する基礎的研究

昭和 54 年 10 月

池 田 哲 朗

序

本論文は、建築壁体における結露障害防止のための基礎的研究として、壁体内における水分と熱移動に関する研究を行なったものである。

我が国の気候は欧米諸国に比し高湿であり、そのため種々の害が生じる。特に結露の害は大きな問題である。古くから、そして現在に至るまでこの結露をいかに防止するかが検討されてきた。従来の日本建築においては、通風性の良い吸放湿性の高い構造にすることの工夫がなされていたが、近年の近代建築においては、密閉性の高い吸放湿性の低い構造となってきたため結露の問題は以前にも増して重要な課題となっている。

この結露の問題に対する現在までの対応は、定常結露防止計算法によって完全に結露を防ぐ設計法によっていた。この方法で設計を行えば安全側の設計となるけれども、非常に無駄な設計となり、時には、経済的にも構造的にも不可能な場合が生じることもある。

壁体の結露現象は、室内外の温湿度変動に伴う非定常過程である。また、この室内の湿度変動は建築を構成する多孔質壁体の吸放湿性により強く影響を受けることが知られており、この材料の吸放湿性は室の水蒸気変動ばかりでなく室温の影響も強く受ける。この温度、水蒸気変動に対する壁の吸放湿量の同定は、昭和 37 年、京都大学名誉教授前田博士により、蒸気拡散支配の熱水分同時移動方程式による表現が為され、その線型方程式による室内温度の非定常計算法の理論も報告され、壁の吸放湿を考えた室内湿度の定量的算定が始めて可能となった。この理論の検討と解析は前田博士に引き続き神戸大学教授松本博士により行なわれ完成させられた。また、この非定常湿度解析を用いて非定常結露防止設計法が前田博士によって示された。この設計法は壁体を蒸気拡散支配系と見なしているため、壁体をハイグロスコピックに維持する防露設計である。

結露問題は結露による障害をいかに防止するかということである。したがって、壁体に結露が生じてても結露障害が防止されれば良い。このことから、壁体内における結露水の蓄積状況を知る必要があり、水分移動を水蒸気移動ばかりでなく、液水移動も考慮した取扱いが必要となる。このことは前田博士により指摘された。

壁体内含水率の予測は、蒸気、液水の併存する水分移動と熱移動とを同時に取扱わねばならず、この現象は十分に確立されていない。そのため結露を許す考え方に基づく計算法として、近似計算法が従来種々提案されている。すなわち、結露時の壁体内結露範囲および結露量を決

定する Glaser の方法、さらに結露水の移動の結果生じる結露範囲の変化を考慮した気液二相の移動境界層モデルによる Vos の方法等がある。しかし、これらは材料内含水率分布の予測というよりも、材料内全体に含まれる結露水の蓄積量の時間変化を見た単純なモデルである。

熱水分同時移動に基づく方程式による結露・蒸発過程の基礎的研究は近年になって行なわれ出した。kooi はこの解析を行なったが、熱移動と水分移動とを独立に取扱い、結露量のみの検討で含水率分布での検討は行なわれていない。また、独立に求めた移動係数を修正することにより実験値と比較している。以上、kooi の研究は不十分な点が多い。

松本博士は、結露障害防止の観点から、壁体内の液・蒸気を含む水分と熱の同時移動方程式を非平衡熱力学にもとずいて導き、壁体内の結露・蒸発過程の解析を行ない、この方程式が結露・蒸発過程を良く予測し得ることを初めて示した。松本博士の解析は kooi と同質の材料（軽量コンクリート）を用いて行なわれている。また、結露・蒸発過程に大きく影響する熱伝導率の含水率による変化は測定されていず推定値が用いられている。しかし、実験結果の両表面温度を与えることにより、この推定値による影響を少なくして方程式の検討が行なわれた。方程式に現われる移動係数は温度によって大きく変化するが、広範囲の温度変化を与えた実験によって検討は行なわれていない。

そこで、本研究では、建築壁体の一つである軟質繊維板を用い、種々の条件下での結露蒸発実験を行ない、松本博士により示された含水率勾配と温度勾配による熱水分同時移動方程式の検討を、方程式に現われる移動係数を独立に求めるとともに、行なった。

以下に本研究の概要を示す。

第 1 章においては本研究の目的を述べた。第 2 章において、本研究に関連する従来の研究について論じる。第 3 章で、従来提案されてきた熱水分同時移動方程式について、Philip and de Vries の理論、Luikov の理論、松本の理論について述べ、本研究で検討する基礎式を示した。第 4 章においては、実験に用いた軟質繊維板の特性を示し、第 5 章で、この材料を使用し、結露過程、蒸発過程の実験を種々の条件で行ない、材料内水分蓄積の挙動を明らかにした。第 6 章では、移動方程式に現われる移動係数の同定を詳細に行なった。第 7 章では、第 3 章で示した熱水分同時移動方程式を結露過程の実験結果と比較することによって検討を行ない、方程式が結露過程を十分予測し得ることを示した。また、方程式を用いて材料内水分移動の解析も行なった。第 8 章においては、理論と実験との解析により、含水率分布を予測し得る近似計算法の試みを行なった。

結露障害防止に関する基礎的研究

第1章 序 論	1
第2章 従来の研究と本研究の位置づけ	
2-1 はじめに	4
2-2 従来の研究	4
2-3 本研究の位置づけ	9
第3章 解析に用いる熱水分同時移動方程式	
3-1 はじめに	11
3-2 Philip and de Vries の理論	11
3-3 Luikov の理論	15
3-4 松本の理論	20
3-5 解析に用いる熱水分移動の基礎微分方程式	26
3-6 第3章のまとめ	29
第4章 軟質繊維板の構造とその特性	
4-1 はじめに	30
4-2 軟質繊維板の選択理由	30
4-3 軟質繊維板の構造	30
4-4 熱伝導率	31
4-5 空隙率	31
4-6 湿気伝導率	31
4-7 材料の空隙分布の一様性	32
4-8 平衡含水率曲線	33
4-9 第4章のまとめ	33
第5章 実 験	
5-1 はじめに	36
5-2 実験装置	36

5-3	実験方法	38
5-4	実験結果とその考察	39
5-4-1	実験条件	39
5-4-2	実験装置の特性	41
5-4-3	内部結露	45
5-4-4	表面結露	50
5-4-5	結露-蒸発過程	51
5-4-6	材料内温度分布	56
5-5	第5章のまとめ	58
第6章 熱水分同時移動方程式に現われる移動係数		
6-1	はじめに	60
6-2	解析に用いる熱水分同時移動方程式	60
6-3	含水率勾配による水分伝導率 D_θ	61
6-3-1	測定方法	61
6-3-2	実験の装置およびその方法	61
6-3-3	実験結果	63
6-3-4	実験結果の考察	66
6-4	含水率勾配による水分伝導率 D_θ の水蒸気成分 $D_{\theta v}$ と液水成分 $D_{\theta \ell}$ への分離	70
6-4-1	従来の分離法	70
6-4-2	D_θ の温度変化より $D_{\theta v}$, $D_{\theta \ell}$ を求める方法	73
6-5	温度勾配による水分伝導率 D_T	77
6-5-1	測定方法	77
6-5-2	温度勾配係数 ε	78
6-5-3	温度勾配による水分伝導率	81
6-6	温度勾配による水分伝導率 D_T の水蒸気成分 D_{Tv} と液水成分 $D_{T\ell}$ への分離	81
6-6-1	分離方法	82
6-6-2	温度勾配による水分伝導率 D_T の液蒸気成分 D_{Tv} , $D_{T\ell}$	82
6-7	含水率による熱伝導率 λ の変化	82

6-7-1	周期法による測定法と得られる熱伝導率	83
6-7-2	測定法に用いられる基礎式	84
6-7-3	実験	85
6-7-4	含水率による熱伝導率 λ の変化	89
6-8	第6章のまとめ	90
第7章 結露過程における熱水分同時移動方程式の検討とその解析		
7-1	はじめに	92
7-2	解析に用いる熱水分同時移動方程式	92
7-3	計算の条件と数値計算の方法	93
7-4	計算に用いた材料の移動係数と物性値	94
7-5	結露過程における熱水分同時移動方程式の検討	98
7-6	計算結果に及ぼす移動係数の影響	100
7-6-1	水分伝導率の液および蒸気成分への分離の影響	102
7-6-2	水分伝導率の温度変化の影響	102
7-6-3	平衡含水率曲線の影響	103
7-6-4	温度勾配係数の影響	105
7-6-5	熱伝導率の影響	106
7-7	熱水分同時移動方程式による結露過程の解析	108
7-8	第7章のまとめ	112
第8章 近似計算法		
8-1	はじめに	114
8-2	位置づけに用いられる基礎式	114
8-3	従来用いられてきた結露計算法の熱水分同時移動方程式 による位置づけとその問題点	115
8-3-1	定常結露防止計算法	115
8-3-2	H.Glaserの方法	116
8-3-3	B.H.Vosの方法	120
8-4	含水率分布を考慮した近似計算法	126
8-4-1	近似計算法の特徴	127
8-4-2	近似計算法の考え方	127

8-4-3	本近似計算法の基礎式による位置づけ	133
8-4-4	計算例	134
8-5	第8章のまとめ	142
記 号	143
引用文献	148

第 1 章 序 論

我が国の気候は欧米諸国に比べて平均して湿度が高いことが特徴となっている。そのため古くから通風性の良い構造でしかも壁や床は吸放湿性の高い材料を用いることにより室内湿度の安定を計り、住環境から高湿度による障害を防ぐように工夫してきた。しかし、近年不燃材料とガラスの普及により気密性の良い建物が多くつくられるようになり、さらに室内仕上材料も耐久性や清潔さから吸放湿性の低い材料の使用が増大してきた。したがって、室内湿度が高湿になりやすく、そのための被害も多く見られるようになってきた。この被害はカビによる汚損、腐朽、含湿膨脹による破損等であり、特に結露の発生の増大とそれによる害の大きさは重要な問題となっている。

この結露問題に対して、我が国においては完全に結露を防ぐことによって処理する方法が用いられてきた。したがって、研究の主眼は材料内の水蒸気移動の機構であり、特に材料の湿気伝導率についての研究は斉藤¹⁾によって詳細に行なわれた。また、建築壁体の吸放湿を考慮した材料内水蒸気移動、室内湿度の形成に関する研究も行なわれた。すなわち、前田により熱と水蒸気移動の相互作用の指摘、非定常による解析の必要性の指摘と、このことの理論的解析がなされた。^{2~4)} 松本はこの理論を発展させ、種々の建築材料の吸放湿過程に対する蒸気拡散支配の熱・水分同時移動の線型方程式の適用の可否について検討し完成させている。⁵⁾ また室内湿度形成に関する実験的研究が堀江らにより行なわれ、相対湿度を水分ポテンシャルとした移動方程式による非定常解析が行なわれた。⁶⁾

以上の研究はいわゆるハイグロスコピックな領域の研究であり、結露を完全に防ぐことを目的としている。結露問題に対して、結露を完全に防ぐことによる対策には限界がある。すなわち、広く用いられている定常結露防止計算法では、計算に用いられる内外温湿度は与えられた内外温湿度の最も危険側を取らなければならない。冬季において、内外温湿度は地域によって時には 40℃ 以上になることもあり、常にこの方法で処理することは経済的にも空間的にも困難な状況をもたらす。そのために、経済的・空間的な制約のもとで設計を行ない、ある程度の結露障害が生じて仕方がないとしている。

実際に結露問題とは何を意味するのかを考えてみるならば、結露の生じることによる実害を防ぐことにあると思われる。したがって、結露は完全に防ぐ必要はなく、一定期間の結露が生

じても実害のない程度であるか、または生じない前に蒸発過程に移ってゆくならば問題はないことになると思われる。このように結露問題をとらえるならば、より現実的な対応が為されるはずである。結露の害は上記に示したように多種多様であり、どのような実害を防ぐかによって検討の程度は異なる。しかし、結露を許す結露障害防止を目的とする場合、材料内における含水率分布の時間経過の予測が基本的な課題となると思われる。このような観点に立った基礎的研究は数少なく Kooi,⁷⁾ 松本⁵⁾ による研究のみである。結露現象を取り扱った近似計算法として Glaser,^{8~11)} Vos^{12,13)} の研究があるが適用に大きな制限がある。

結露障害防止の問題を材料内水分移動でとらえるならば次のようになるであろう。すなわち、温度勾配の条件下で、最初材料が乾燥していて、内外温湿度の変化とともに、水蒸気移動の支配的な領域から結露の発生が起り、それとともに含水率が増大し液水移動の支配的な領域へ移行してゆく。さらに条件の変化により蒸発過程となり含水率が減少してゆく。結局、温度勾配のある場合の熱と水分（水蒸気と液水）の同時移動の問題である。

結露障害防止という観点からではなく、材料内水分移動の研究は土質工学、乾燥工学の分野において古くから行なわれてきている。土質工学の分野においては主に高含水率の範囲、すなわち液水移動が支配的な領域の研究であり、乾燥工学の分野においては材料の一定含水率状態からの乾燥過程の研究が主である。

このように多くの研究が為されているが、熱水分同時移動の問題は未だ確立されたとは言えず、特に結露障害防止に関連する温度勾配下の蒸気、液の共存する範囲の機構の解明は完全でない。この主要な原因は移動現象が複雑であること、言いかえると現象の把握が困難であること、また、種々提案されている移動方程式に現われる移動係数を決定することが困難であることによると思われる。したがって、これらの問題に対処することによって移動機構を明らかにすることは重要である。また、移動機構が明らかになった後も、この現象を記述する方程式は複雑であることから、どんな問題に対しても実用上常に用いられるとは言えない。このことから、近似的な計算法を確立することは価値のあることと言えよう。

以上述べたことから、結露障害防止に関する基礎的な研究を目的として、本研究は以下の項目について検討を行なう。

- 1) 材料内の水分蓄積の挙動を実験的に十分把握すること。

- 2) 水分移動の機構を表現する基礎式を確立すること。すなわち、実験結果と比較することによって、材料内水分移動のモデル化の妥当性の検討を行なう。また、基礎式に現われる移動係数の決定法とその精度の検討を行なうこと。さらに、基礎式に基づき材料内水分機構を明らかにすること。

3) 理論および実験とから現象を把握し得る近似計算法を検討すること。

以上の項目に関して、本研究は次のようにまとめている。

第2章においては、関連する従来の研究について述べ、本研究の位置づけを行なった。第3章は、従来から提案されている熱水分同時移動方程式を述べ、本研究で検討する基礎式を示した。第4章では、理論の検討、および実験把握を行なうための実験材料の特性を述べ、第5章において、この材料を用いて種々の条件下での実験を行ない、材料内水分蓄積の挙動と結露障害防止に関連する特性を明らかにした。第6章では、検討すべき基礎式に現われる移動係数の決定について述べた。第7章は、実験結果に基づき基礎式の検討ならびに移動係数の影響について述べ、さらに基礎式に基づき材料内水分蓄積の挙動を明らかにした。第8章において、従来の近似計算法の基礎式による位置づけと問題点を示し、さらに理論と実験とから含水率分布を予測し得る近似計算法について述べた。

第 2 章 従来の研究と本研究の位置づけ

2-1 はじめに

我々が問題とする結露障害防止に関連する研究内容は、非常に多岐にわたっている。また、この関連した研究は古くから行なわれてきている。ここでは、建築、乾燥、土質等の分野で行なわれてきた本研究に関連する研究を取り上げ、本研究の位置づけを行なう。

2-2 従来の研究

壁体内部の結露防止の研究は、1923年のU.S.Forest Product Laboratoryの研究が最初であると言われている⁵⁾。我が国における結露問題における対応は、完全に結露を防ぐことをまず目的としたため水蒸気移動に関するものが多い。これに関連して、建築材料の水蒸気移動に対する湿気伝導率の測定が斎藤によって詳細に行なわれた¹⁾。また、結露を取り扱う場合に欠くことの出来ない室内湿度形成のための研究も行なわれている。すなわち、一般に室内温湿度は変動しており、外気も同様である。結露防止設計を非定常過程として取扱うべきことが前田によって指摘され³⁾、材料内水分移動における熱流との連結作用の重要性と吸放湿に関する検討が行なわれた²⁾が、内部の水分移動機構が十分解明されていなかったこともあり、分布系としての熱水蒸気の同時移動方程式が発表されたのは1962年であった⁴⁾。その後、松本によってこの理論が発展され、種々の材料による実験に基づき吸放湿過程に対する蒸気移動支配の熱・水分同時移動の線型方程式の適用の可否について検討が行なわれて完成せられた⁵⁾。また、堀江らにより、室内湿度の吸放湿材料による影響に関する実験的研究が行なわれ、相対湿度を水分ポテンシャルとした水分移動方程式により壁体水分の非定常解析が行なわれた⁶⁾。この移動ポテンシャルは、松本によって後に妥当なポテンシャルであることが証明された⁵⁾自由水基準の化学ポテンシャルの指数関数であり注目すべき提案であった。以上の研究はすべてハイグロスコピックの領域のものである。

実際に材料内に結露した水分についての研究は、水蒸気移動をもとに結露範囲、結露量の計算を可能にしたGlaserの研究^{8~11)}また、屋根構造特有の内部結露に対する V_{os} ^{12,13)}の研究がある。これらはいずれも近似解法であった。本格的な結露を許す結露障害防止に関する材料内

水分同時移動の問題を取り扱い出したのは最近であり、松本,⁵⁾ Cool⁷⁾の研究がある。これらの研究内容については後に対応する項で述べる。

材料内の液水移動の研究は古く、特に不飽和材料中の等温状態における研究の最初の定式化は1907年に Buckingham によって行なわれたと言われる。¹⁴⁾ この定式化は熱や電気の流れに相似して扱われたものであるが、後に Israelson (1927年) が述べ、Richards (1928, 1931年) によって明確に議論され、Childs and Collis-Geerge (1948年) が利用した飽和流れに対する Darcy's law を不飽和流れに対して拡張した式と同じものであった。¹⁴⁾

Darcy's lawの不飽和流れへの拡張は、その移動係数(Permeability)を飽和度、すなわち含水率の函数としてとらえたものであり、また移動ポテンシャルの水圧を不飽和時の毛細管ポテンシャルとし、このポテンシャルが含水率によって変化すると考えている。この式を変形することにより、移動ポテンシャルを含水率とした拡散方程式により解析が行なわれた。この拡散方程式に現われる移動係数が含水率によって変化するため、拡散方程式は非線型である。このために、この方程式についての解法は種々行なわれてきた。Philip¹⁵⁾ は水平浸透、垂直浸透、水面がある場合の垂直浸透について、Boltzman変換を使用して拡散方程式を常微分化することにより解を得る方法を詳しく研究した。また、方程式の持つ物理的な特性をも検討している。この他、拡散係数を指数近似することにより求める方法、¹⁶⁾ 拡散係数を一定とすることにより内部発生項のある線型拡散方程式として求める方法、¹⁶⁾ 拡散係数の函数近似と表面水分流を与えることにより方程式を線型化する方法¹⁷⁾ がある。さらに、材料内含水率分布形を仮定し、拡散方程式の0次と1次モーメントの二つの式を用いて係数を決める方法、¹⁶⁾ 拡散方程式を変数変換し、境界における流入量と材料内部での含水量との関係から逐次近似して求める方法等¹⁸⁾ が与えられている。

温度勾配のある場合の水分移動の現象を現場測定により確認したのは Lebedeff¹⁹⁾ (1927年) であり、実験的に見出したのは Rollins²⁰⁾ (1954年) 等であった。以後、空隙材料中の水分移動(水蒸気移動)を Fick's law の修正により取扱った。しかし、この理論の解析は常に実験値の数分の1であることがわかった。このような現象を明解に理論付けたのは、Philip and de Vries²¹⁾ であった。彼等は、水蒸気移動の前述の矛盾を材料中の水蒸気移動に対して新たにモデル化することにより明らかにした。また、液水移動を前述の Darcy's law の拡張による式で表現できるとして、温度勾配のある場合の水分(水蒸気と液水)の移動式を含水率勾配と温度勾配によるものとして表現した。さらに、熱の移動式も相変化を考慮して提示し、熱水分の変化方程式を示した。この変化方程式は材料内の水蒸気と液水との局所平衡を仮定している。しかし、これらの変化方程式の実験値との対応は行なわれなかった。

熱水分の同時移動を統一的に取扱ったのは優れた物理学者 A.V.Luikov である。Luikov と

その協同研究者達の研究結果はまとめて発刊されている。^{22,23)}彼は空隙材料を毛細管コロイド材料としてとらえ、水蒸気移動は分子とモルの移動を、液水移動は毛細管ポテンシャルと浸透圧による移動とし、これらの移動を材料空隙の毛細管分布を考慮して定式化し、Philip and de Vries と同様含水率勾配と温度勾配による移動方程式を導出した。また、古典的非平衡熱力学を完成した Prigogine,²⁴⁾ de Groot²⁵⁾等の理論を多孔質体の熱水分移動問題に初めて適用し、彼等の現象論的方程式を統一的に把握した。彼等は水分移動ポテンシャルが本質的に含水率でないこと、そして標準汙紙の含水率を統一的なポテンシャルとすることを提案している。このことについて次の指摘が為されている。すなわち、彼等の提案は正しいけれども、標準汙紙の含水率は実験的に定義されたものであり、熱力学的には一般的でなく、後に彼等によって示された自由水基準の水の化学ポテンシャルは非可逆過程の熱力学による妥当性が示されていないため拡散係数の定義があいまいになっている。⁵⁾彼等は熱水分同時移動に対する変化方程式も提案している。ここで、水蒸気と液水の移動に伴う相変化による熱も考慮されている。しかし相変化量は内外条件によって変化するため材料特有の値ではないが、一定値として取扱っている。

高含水部分を含む系における水分移動理論における乾燥工学、とくに Krischer^{26,27)} と協同研究者の基礎的研究の寄与は非常に大きい。高低含水率を同時に含む系における含水率変化の特性、蒸発速度に関する詳細な研究はその後のモデルの構成、物性値の同定に欠くべからざる根拠を与えることになった。Krischer の多孔質体内の水蒸気、液水の移動に関する基礎的研究と種々の多孔体内における水分伝導率の詳細な測定結果は特に重要である。桐栄等は、材料特性の異なる種々の材料における乾燥過程の実験を詳細に行ない、²⁸⁾ 液水移動を含む複雑な系についての移動メカニズムの研究を行なった。その結果、乾湿 2 zone の移動境界層モデルによる減率乾燥期間内の熱水分同時移動の解析を行ない、^{29,30)} とくに水分の局所非平衡系を初めて導入して解析を行なっている。

Carry and Tayler^{31~33)} は非可逆過程の熱力学より得られた物質とエネルギーの流速と駆動力との関係から空気中および材料中の水蒸気移動について水蒸気圧と温度による流速を求める関係式を導き、式に現われる係数間の関係を実験によりテストし、さらに係数の物理的内容を明らかにした。また、材料中の水蒸気、液双方を含む水分移動に関しても一般的な流速を求める式を誘導し、すでに知られている現象論方程式の位置づけを行なった。³⁴⁾ 同時に熱水分の同時移動に対する変化方程式を導いているが、係数実験結果から定数とおいている。このことに関して、全面断湿系における soil 内水分移動の実験結果から一般的には定数とおけないことが指摘されている。³⁵⁾

水蒸気移動、液水移動、熱の移動を相変化のある場合に非局所平衡で定式化し、すでに示さ

れた変化方程式の位置づけが1967年松本によって行なわれた。³⁶⁾ また、これと同様な非局所平衡の考えをもとにした理論の検討も行なわれている。³⁷⁾

Kooi⁷⁾は結露過程の実験により、de Vriesの式、Luikovの式、Krischerの式の検討を行った。移動方程式に現われる係数については独立に詳細な測定を行なっている。検討の結果、de Vriesの式が実験結果と良く一致しているとしているが、独立に求めた移動係数を修正して使用している。また、実験は結露過程の初期の段階で止めており、含水率の高い状態における挙動は検討されていない。さらに、材料内含水率の測定が行なわれていないため我々にとって重要な要素である含水率分布の予測の検討が為されていない。以上のごとく、理論式の妥当性の検討、物性値の妥当性の検討にいたっていない。なお、熱移動についても、水分移動との相互作用を考慮せず擬定常で扱っている。

松本は、建築壁体の結露過程の解析、壁体内の含水率および熱流の変化の予測を目的に、非可逆過程の熱力学を使用して、壁体の変形、圧力差によるBulkな流れを含む一般式を導き、多層構造の問題を解くに適切な水分移動ポテンシャルは自由水基準の化学ポテンシャルであることを提示した。^{38,39)} さらに、この一般式から従来の現象論方程式を導き対応させた。また、軽量コンクリート、気泡コンクリートにおける結露、蒸発実験を行ない、局所平衡による理論の妥当性を述べている。移動係数は独立に行なわれたが、温度勾配による水分伝導率を求める時に必要な温度勾配係数は、全面断湿系より得られる値では実験と一致しないこと、結露過程において、この過程中的動的平衡から求めると良いことが言われている。⁵⁾

以上、熱水分移動の基礎式の導出およびこの基礎式の検討に関する従来の研究を述べてきたが、この基礎式の検討の重要な要素は移動方程式に現われる種々の移動係数の同定にある。これらの移動係数は温度あるいは含水率により大きく変化する。

等温状態の水分移動の係数の測定は土質工学の分野で数多く行なわれており、種々の方法が提案されている。しかし、これらの方法はすべて粒状物質に対するものであり、容易に材料が分割されること、任意の大きさの試料が得られること、および含水率が大なる部分、すなわち、テンシオメータによって測定できる範囲のものであることから、我々の建築材料での結露現象を知るための測定法には適さない。実際に建築材料における含水率勾配に対する水分伝導率の測定の例は少ない。^{5,7,40)}

温度勾配による水分伝導率は、全面断湿系における動的平衡時の温度と含水率分布とより温度勾配係数を求め、これと含水率勾配による水分伝導率とから求めている。⁴¹⁾ しかし、この方法で求めた係数の使用では実験が解析できないことが報告され、^{5,7)} この時の動的平衡の問題が指摘されている。

材料内水分移動において、相変化の生じる場合には熱の発生、吸収があり熱移動に影響を与える。このことは、上記の移動係数の液、水蒸気成分の分離を必要とする。この分離に対する明確な方法は与えられておらず、種々の方法が検討されている。すなわち、塩溶液を用いて分離する方法⁴²⁾、全圧による水蒸気拡散係数の変化を利用する方法⁴³⁾などがある。これはいずれも建築材料には不適當であると思われる。したがって、理論の構成および理論の検討において分離は、相変化量を一定とする方法²²⁾、熱と水分移動を独立に取り扱う方法⁷⁾、移動ポテンシャルを化学ポテンシャルで取り扱うため、温度による移動係数の液水成分の寄与が少なくなり、従ってこの係数は水蒸気移動のみとして取り扱う方法等によっている。⁵⁾

水分移動係数の温度による変化についても検討されているのは少ない。定性的な検討は行なわれているが、温度勾配を小さくしてこの影響を少なくして理論が検討されている。⁵⁾

含水率の変化による熱伝導率の変化は大きく、この変化を無視しては結露、蒸発過程を取り扱うことはできないと思われる。この熱伝導率の測定は数多く試みられているけれども、^{44,45,46)}水分移動を伴うため熱水分同時移動の機構が明確にされ得ない状況のもとでは理論的基礎の上に立った測定法となり得ない。したがって、理論に基づく熱伝導率の測定を使用した検討は行なわれていない。従来の理論式の検討においては、疑似定常として熱伝導を取り扱っているものの⁷⁾、材料両表面温を実験より求めた値を使用することにより、熱伝導率の不確かさの影響を少なくして行なっているものがある。⁵⁾

近年、移動係数の同定に確率モデルを使用した研究が発表されている。^{47~50)}これらはいずれも材料内の空隙をモデル化するとともに、材料の毛細管分布を確率密度として与え、その結果材料内の水分係数を求めている。材料内構造を明らかにすることによって、移動機構を知るといふ点興味のあることであるが未だ実用的とは思われない。

以上は、材料内水分移動の機構に関する基礎的研究に関連したものであるが、現実の結露問題に対処するために近似的な計算法が試みられてきている。

Glaser^{8~11)}は材料内における水蒸気圧が温度に応じる飽和水蒸気圧以上にならないこと、水蒸気流の連続性を利用して材料内の結露を取り扱った。このような条件から結露範囲、結露量を計算し得る。また、結露範囲内の空隙にすべて液がつまるとしている。結露過程を取り扱っている点より現実的ではあるが、蓄積した結露水がその場所に留まり移動しないという仮定から、高含水率になると適用し得なくなる。

Vos^{12,13)}はさらに液水移動を考慮した方法を提案している。すなわち、材料内液水移動の大きな特徴として、ある含水率以上になると急激に含水率による水分移動係数が増大する。この特徴を利用することにより、結露過程中的材料を水蒸気移動の支配的な領域と液水移動の支配

的な領域に分け、この分離境界面における水分収支よりこの面の移動を与える計算法である。この概念は桐栄等による減率乾燥、第2段の2 Zone 法²⁹⁾と同じものである。この方法は、材料の水分移動の特徴をとらえた簡便で有効な方法であるが、片面断湿という条件下であること、限界含水率は材料特性値として必ずしも決定されるものでなく、種々の材料に適用する場合に全吸湿量の液水支配領域における平均含水率を取らなければならないため条件によって異なる性質を持っていること等が問題として挙げられよう。

2-3 本研究の位置づけ

前節において従来の研究を見てきたが、結露障害防止に関連した研究は多く、また十分把握されている内容も多い。たとえば、粒状物質内の等温下での高含水率範囲における液水移動の挙動はほとんど完成されたと言って良いと思われる。最近の研究は移動係数の測定法について、いかに精度良く行なうかという点に注目されているようである。また、Kricher に始まり、桐栄等の研究による詳細な実験的現象把握に基づく乾燥理論も確立されていると考えられる。乾燥工学においては、さらに材料内部の機構を解明することにより移動機構を取り扱う方向に行っていると思われる。しかし、我々が研究対象としている建築材料中の結露過程のような温度勾配下における液、水蒸気移動共存の熱水分移動機構に対して、上記の研究内容では不十分であると言える。この問題に対する研究は少なく、Kooi、松本によるのみである。彼等の研究は本研究の目的と全く同じである。しかし、Kooi の研究は結露過程として考えられる範囲をすべて取り扱った実験の対応でなく、また移動係数の測定値の修正によって理論の妥当性を述べている。また、蒸発過程も結露後の過程として取り扱っていない。松本によって始めて結露および蒸発過程に対する熱水分同時移動方程式の理論の妥当性が示されたと言える。

Kooi、松本は同種の材料(軽量コンクリート、気泡コンクリート)についての検討であり、熱水分移動の機構をマクロに見る限り、材料の違いによって空隙構造が大巾に異なるため、この違いによる移動方程式の妥当性の検討は必要である。本研究で用いられた軟質繊維板についての研究は重要なことであると言える。また移動方程式に現われる移動係数は温度と含水率により大きく変化する。松本の研究は、この温度変化の影響があまり出ない範囲の実験によっており、巾広い温度範囲に対する検討も必要である。さらに、移動係数の液、蒸気成分の分離法の確立、熱伝導率の含水率変化による影響および熱伝導率測定値に基づく解析等、移動係数の同定の妥当性の検討を含め、熱水分同時移動の機構の確立にはさらに検討する部分が多くあると思われる。

以上述べてきたように、この熱水分移動の機構の確立が十分なし得なかった基本的な原因は、材料内の熱水分移動の実態の把握の困難さ、すなわち、実験的困難さにあると考え、種々の条件下における材料内水分蓄積の挙動、および移動係数の決定のための実験を出来るだけ詳細に行なうことによって研究を進めた。また、熱水分移動の機構が複雑であるがゆえに、近似計算法の価値を認め、簡便で現象を把握できる近似計算法についても検討した。

本研究は、簡単に言うならば、Kooi、松本による研究と並行に、さらに上記の種々の問題を考慮した研究であり、結露障害防止設計のための基礎研究における彼等の研究の延長上にあると位置づけられよう。

第 3 章 解析に用いる熱水分同時移動方程式

3-1 はじめに

熱水分の同時移動方程式の研究は、今までに見てきたように多く行なわれているが、大別して三つに分けられる。Philip and De Vries の現象論的にマクロに見る解析、Luikov の材料内の空隙を毛細管の束として見るミクロな解析、松本の非可逆過程の熱力学を用いて材料内の移動を考慮した解析である。いずれも最終的には、我々が検討しようとする水蒸気と液水の二相流としての水分移動の基礎式が導かれ、温度と含水率を移動ポテンシャルとする移動方程式になる。ここでは上記の三つの理論を示し、最終的な基礎方程式を提示する。

3-2 Philip and Vries の理論²¹⁾

(1) 水蒸気移動

空隙内に適用される水蒸気拡散の式は、Fick's law を材料内空隙中の拡散に拡張して次式で表わされる。^{51~54)}

$$q_v = -D_{atm} \nu \kappa a \nabla \rho_v \quad (3-1)$$

ここで、 ν はいわゆる一方拡散の Stefan's law より

$$\nu = \frac{P}{P - p_v} \quad (3-2)$$

である。また ρ_v は熱力学的関係により

$$\rho_v = \rho_{v0} h = \rho_{v0} \exp [\Psi g / RT] \quad (3-3)$$

したがって、

$$\nabla \rho_v = h \nabla \rho_{v0} + \rho_{v0} \nabla h \quad (3-4)$$

ここで、 h は含水率のみに依存し、 ρ_{v0} は温度のみに依存するとすると

$$\nabla \rho_v = h \frac{d\rho_{v0}}{dT} \nabla T + \rho_{v0} \frac{dh}{d\theta} \nabla \theta \quad (3-5)$$

また, (3-3) より

$$\frac{dh}{d\theta} = \frac{g}{RT} \exp[\Psi g/RT] \frac{d\Psi}{d\theta} \quad (3-6)$$

よって, (3-5) は

$$\nabla \rho_v = h \frac{d\rho_{v0}}{dT} \nabla T + \frac{\rho_v g}{RT} \frac{d\Psi}{d\theta} \nabla \theta \quad (3-7)$$

となる。

結局, 水蒸気移動は

$$\begin{aligned} q_v &= -D_{atm} \frac{P}{P - p_v} \kappa a \left\{ h \frac{d\rho_{v0}}{dT} \nabla T + \frac{\rho_v g}{RT} \frac{d\Psi}{d\theta} \nabla \theta \right\} \\ &= -D_{\theta v} \nabla \theta - D_{Tv} \nabla T \end{aligned} \quad (3-8)$$

ここで,

$$D_{\theta v} = D_{atm} \frac{P}{P - p_v} \kappa a \frac{\rho_v g}{RT} \frac{d\Psi}{d\theta} \quad (3-9)$$

$$D_{Tv} = D_{atm} \frac{P}{P - p_v} \kappa a h \frac{d\rho_{v0}}{dT} \quad (3-10)$$

と書ける。

ここで, de Vries 等は, (3-1) 式に基づく水蒸気移動量が実験による水蒸気移動量に比し常に小さいという結果^{55~57)}を次のように解釈して (3-8) 式を修正した。

修正 1. 含水率が小さい時, そして液水移動が零と見なせる範囲において, 液は材料内で不連続になっている。この時の水蒸気移動を考えると, (3-1) 式では液の存在している断面での水蒸気移動は除かれている。しかし, 図 3-1 に示されているように, 断面 1 で水蒸気が凝縮し, 断面 2 で蒸発が生じる。この時, 断面 1 の液面のメニスカスの曲率半径が増大し, 断面 2 の曲率半径が減少する。その結果, 断面 1 から 2 へ液水移動が生じる。また, この現象は速い。結局, 液の存在する断面においても, 見かけ上水蒸気移動に寄与していることになる。よって, (3-1) の a は実際の空隙率ではなく, 材料の乾燥状態における空隙率にしておくべきである。すなわち, $a \rightarrow a + \theta/\rho_w$ 。

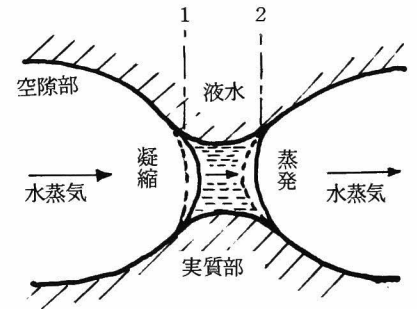


図 3-1 不連続液水の存在している部分における水分移動

含水率の増大にともない, 液水移動が生じるようになるが, 同様な推定から, $a + \theta/\rho_w$ を

$a + f(a) \theta / \rho_w$ とおくことによりすべての含水率範囲に適用され得る。

修正 2. (3-8) 式の ∇T は材料全体の温度勾配である。しかし、水蒸気移動は空隙中の温度勾配 $(\nabla T)_a$ によって実際は生じるものである。(3-1) 式において、この点の考慮を κ によって表現している。実際の空隙における平均温度勾配 $(\nabla T)_a$ を使用すれば、(3-8) 式の温度勾配の項は次式となる。

$$-D_{Tv} \nabla T = - \left\{ a + f(a) \frac{\theta}{\rho_w} \right\} D_{atm} \frac{P}{P - p_v} h \frac{d\rho_{v0}}{dT} (\nabla T)_a \quad (3-11)$$

ここで導入された $(\nabla T)_a$ は、材料を実質部、液、空隙の三相よりなるとし、各相の形をモデル化することにより数値計算で求められる。(3-11) から (3-1) の κ に相当するものとして

$$\kappa = \frac{(\nabla T)_a}{\nabla T} \quad (3-12)$$

以上の二つの修正により得られた水蒸気移動の式は

$$q_v = -D_{atm} \frac{P}{P - p_v} \left\{ a + f(a) \frac{\theta}{\rho_w} \right\} \frac{(\nabla T)_a}{\nabla T} \nabla \rho_v \quad (3-13)$$

$$= -D_{\theta v} \nabla \theta - D_{Tv} \nabla T \quad (3-14)$$

$$D_{\theta v} = D_{atm} \frac{P}{P - p_v} \left\{ a + f(a) \frac{\theta}{\rho_w} \right\} \frac{(\nabla T)_a}{\nabla T} \frac{\rho_v g}{RT} \frac{d\Psi}{d\theta} \quad (3-15)$$

$$D_{Tv} = D_{atm} \frac{P}{P - p_v} \left\{ a + f(a) \frac{\theta}{\rho_w} \right\} \frac{(\nabla T)_a}{\nabla T} h \frac{d\rho_{v0}}{dT} \quad (3-16)$$

となる。

(2) 液水移動

不飽和材料内における液水移動に対して、Darcy's law を拡張して適用すると

$$q_\ell = -\rho_w K \nabla \phi \quad (3-17)$$

ここで、 ϕ を重力成分も含むとすると

$$\phi = \Psi + z \quad (3-18)$$

z は垂直座標で上向きを正とする。 Ψ は液水移動の生じる含水率の範囲内 ($K > 0$) において毛細管によって決定される。すなわち、

$$\Psi = \frac{1}{\rho_w} \frac{2\sigma}{rg} \quad (3-19)$$

よって

$$\frac{\partial \Psi}{\partial T} = \frac{2}{\rho_w r g} \frac{d\sigma}{dT} = \frac{\Psi}{\sigma} \frac{d\sigma}{dT} \quad (3-20)$$

(3-17), (3-18) から

$$q_\ell = -\rho_w K \nabla \Phi = -\rho_w K \nabla (\Psi + z) = -\rho_w K \nabla \Psi - \rho_w K i \quad (3-21)$$

ここで、 i は正の z 方向における単位ベクトル、 Ψ は含水率 (θ) と温度 (T) の関数であるから、結局、液水移動の式は

$$\begin{aligned} q_\ell &= -\rho_w K \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \nabla \theta - \rho_w K \frac{\partial \Psi}{\partial T} \nabla T - \rho_w K i \\ &= -\rho_w K \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \nabla \theta - \rho_w K \frac{\Psi}{\sigma} \frac{d\sigma}{dT} \nabla T - \rho_w K i \\ &= -D_{\theta\ell} \nabla \theta - D_{T\ell} \nabla T - \rho_w K i \end{aligned} \quad (3-22)$$

$$D_{\theta\ell} = \rho_w K \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \quad (3-23)$$

$$D_{T\ell} = \rho_w K \frac{\Psi}{\sigma} \frac{d\sigma}{dT} \quad (3-24)$$

となる。

(3) 熱移動

水分移動が存在する場合の熱の移動は水蒸気成分による熱移動を考慮して

$$q_h = -\lambda \nabla T - L q_v \quad (3-25)$$

$$= -\lambda \nabla T - L (D_{Tv} \nabla T + D_{\theta v} \nabla \theta)$$

$$= -(\lambda + L D_{Tv}) \nabla T - L D_{\theta v} \nabla \theta \quad (3-26)$$

と表現できる。

(4) 熱水分同時移動の基礎微分方程式

以上の熱と水分の移動方程式をまとめると以下のごとくなる。すなわち、水分移動に対して、水蒸気と液水との流れを二相流と考え、(3-14), (3-22) から

$$q_w = q_v + q_\ell = -D_{\theta v} \nabla \theta - D_{Tv} \nabla T - D_{\theta\ell} \nabla \theta - D_{T\ell} \nabla T - \rho_w K i$$

$$= -D_{\theta} \nabla \theta - D_T \nabla T - \rho_w K i \quad (3-27)$$

$$D_{\theta} = D_{\theta v} + D_{\theta \ell} \quad (3-28)$$

$$D_T = D_{Tv} + D_{T\ell} \quad (3-29)$$

熱移動に対しては、(3-26)で

$$q_h = -(\lambda + LD_{Tv}) \nabla T - LD_{\theta v} \nabla \theta \quad (3-26)$$

以上の熱・水分流の基礎式をもとに、材料内熱水分の収支をとると、基礎微分方程式は次式となる。

水分移動の微分方程式は

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot (D_T \nabla T) + \nabla \cdot (D_{\theta} \nabla \theta) + \rho_w \frac{\partial K}{\partial Z} \quad (3-30)$$

熱移動の微分方程式は

$$C \tau \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot [(\lambda + LD_{Tv}) \nabla T] + L \nabla \cdot (D_{\theta v} \nabla \theta) \quad (3-31)$$

である。

3-3 Luikov の理論²²⁾

湿り材料あるいは毛細管コロイド材料は空隙性でコロイドの性質を持っている。また、空隙は種々の半径の毛細管より構成されているとし、その時の毛細管半径と毛細管の数とは毛細管分布で示される。すなわち、図3-2のごとくである。

このような材料中における物質移動は分子とモルの移動のすべてを取る可能性がある。

(1) 水蒸気移動

材料中での水蒸気移動は毛細管の大きさより二通りある。今、分子の平均自由行路を ℓ とすると、 $\ell > r$ である毛細管をミクロな毛細管、 $\ell < r$ である毛細管をマクロな毛細管と名付ける。

a) マクロな毛細管における水蒸気移動

一本の毛細管における水蒸気流 $v_{v,ma}$ は Stefan's law により

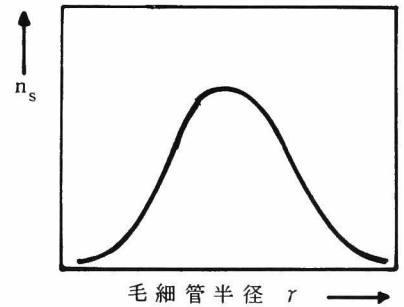


図3-2 毛細管分布

$$v_{v,ma} = -D_{atm} \frac{P}{(P - p_v)} \nabla p_v \quad (3-32)$$

材料中マクロな毛細管で液のつまっていない最大半径を r_m 、最小半径 r_0 とすれば、このような毛細管中を流れる全水蒸気流 $q_{v,ma}$ は

$$q_{v,ma} = \rho_v \int_{r_0}^{r_m} \pi r^2 v_{v,ma} \frac{dn_s}{dr} dr = -D_{atm} \frac{P}{(P - p_v)} \frac{m_v \epsilon_v}{RT} \nabla p_v \quad (3-33)$$

ここで

$$\epsilon_v = \int_{r_0}^{r_m} \pi r^2 \frac{dn_s}{dr} dr = \int_{r_0}^{r_m} f_s(r) dr \quad (3-34)$$

b) ミクロな毛細管における水蒸気移動

ミクロな毛細管における分子は他の分子とは独立に毛細管壁に衝突しながら移動する。このような流れを Knudsen-flow あるいは effusion という。水蒸気圧差と温度差がある場合の半径 r の毛細管中における水蒸気流 $v_{v,mi}$ は

$$v_{v,mi} = -\frac{8}{3} r \sqrt{\frac{m_v}{2\pi RT}} \frac{1}{\rho_v} \nabla \left(\frac{p_v}{\sqrt{T}} \right) \quad (3-35)$$

したがって、材料全体の effusion による移動は、ミクロな毛細管で液のつまっていない最大半径を r'_m 、最小半径を r'_0 とすると、

$$q_{v,mi} = \rho_v \int_{r'_0}^{r'_m} \pi r^2 v_{v,mi} \frac{dn_s}{dr} dr = -\frac{8}{3} \sqrt{\frac{m_v}{2\pi RT}} \xi \nabla \left(\frac{p_v}{\sqrt{T}} \right) \quad (3-36)$$

ここで

$$\xi = \int_{r'_0}^{r'_m} \pi r^2 \cdot r \frac{dn_s}{dr} dr = \int_{r'_0}^{r'_m} r f_s(r) dr \quad (3-37)$$

c) 材料中の水蒸気移動

以上、材料中の水蒸気移動流 q_v をまとめると

$$q_v = q_{v,ma} + q_{v,mi} = -D_{atm} \frac{P}{(P - p_v)} \frac{m_v \epsilon_v}{RT} \nabla p_v - \frac{8}{3} \sqrt{\frac{m_v}{2\pi RT}} \xi \nabla \left(\frac{p_v}{\sqrt{T}} \right) \quad (3-38)$$

ここで、材料中において局所平衡の仮定が成立するとすると、平衡含水率曲線 $p_v = p_v(\theta, T)$ を用いて、

$$\nabla p_v = \frac{\partial p_v}{\partial \theta} \nabla \theta + \frac{\partial p_v}{\partial T} \nabla T \quad (3-39)$$

$$\nabla \left(\frac{p_v}{\sqrt{T}} \right) = \frac{1}{\sqrt{T}} \frac{\partial p_v}{\partial \theta} \nabla \theta + \frac{1}{\sqrt{T}} \left(\frac{\partial p_v}{\partial T} - \frac{p_v}{2T} \right) \nabla T \quad (3-40)$$

したがって、(3-38) に上式を代入し整理すると

$$q_v = -D_{\theta v} \nabla \theta - D_{Tv} \nabla T \quad (3-41)$$

ここで

$$D_{\theta v} = D_{atm} \frac{P}{(P - p_v)} \frac{m_v \varepsilon_v}{RT} \frac{\partial p_v}{\partial T} + \frac{8}{3} \sqrt{\frac{m_v}{2\pi R}} \xi \frac{1}{T} \frac{\partial p_v}{\partial \theta} \quad (3-42)$$

$$D_{Tv} = D_{atm} \frac{P}{(P - p_v)} \frac{m_v \varepsilon_v}{RT} \frac{\partial p_v}{\partial T} + \frac{8}{3} \sqrt{\frac{m_v}{2\pi R}} \xi \frac{1}{T^{\frac{3}{2}}} \left(\frac{\partial p_v}{\partial T} - \frac{p}{2T} \right) \quad (3-43)$$

と書ける。

(2) 液水移動

a) 毛細管ポテンシャルによる液水移動

毛細管内液水移動は毛細管ポテンシャルの差による Poiseuille flow (層流流れ) と考え、半径 r の毛細管内移動流 v_w は

$$v_w = \frac{r^2 \rho_w}{8\eta} \nabla \psi \quad (3-44)$$

したがって、材料全体における液水移動は、液のつまっている毛細管の最大半径を r_m'' 、最小半径を r_0'' とすると

$$\begin{aligned} q_{l,ka} &= \rho_w \int_{r_0''}^{r_m''} \pi r^2 v_w \frac{dn_s}{dr} dr = \frac{\rho_w^2}{8\eta} \int_{r_0''}^{r_m''} r^2 \pi r^2 \frac{dn_s}{dr} \nabla \psi \\ &= \chi_\phi \nabla \psi \end{aligned} \quad (3-45)$$

ここで

$$\chi_\phi = \frac{\rho_w^2}{8\eta} \int_{r_0''}^{r_m''} r^2 f_s(r) dr \quad (3-46)$$

半径 r の毛細管における毛細管ポテンシャルは液の接触角を零として

$$\psi = \frac{1}{\rho_w} \frac{2\sigma}{rg} \quad (3-47)$$

であるから

$$\nabla \psi = \frac{\partial \psi}{\partial r} \nabla r + \frac{\partial \psi}{\partial T} \nabla T = -\frac{2\sigma}{g\rho_w r^2} \nabla r + \frac{2}{g\rho_w r} \frac{d\sigma}{dT} \nabla T \quad (3-48)$$

また、毛細管の半径 r_0'' から r_x'' まで液がつまっている時の含水率 θ は

$$\theta = \rho_w \int_{r_0''}^{r_x''} \pi r^2 \frac{dn_s}{dr} dr = \rho_w \int_{r_0''}^{r_x''} f_s(r) dr \quad (3-49)$$

よって

$$\nabla \theta = \frac{\partial \theta}{\partial r} \nabla r = \rho_w f_s(r) \nabla r \quad (3-50)$$

(3-48) は

$$\nabla \psi = - \frac{2\sigma}{g\rho_w^2 r^2 f_s(r)} \nabla \theta + \frac{2}{g\rho_w r} \frac{d\sigma}{dT} \nabla T \quad (3-51)$$

したがって、(3-45) は

$$q_{\ell,ka} = -D_{\theta\ell,ka} \nabla \theta - D_{T\ell,ka} \nabla T \quad (3-52)$$

$$D_{\theta\ell,ka} = \frac{2\sigma}{g\rho_w^2 r^2 f_s(r)} \chi_\phi \quad (3-53)$$

$$D_{T\ell,ka} = - \frac{2}{g\rho_w r} \frac{d\sigma}{dT} \chi_\phi \quad (3-54)$$

と書ける。

b) 浸透圧による液水移動

毛細管コロイド材料においては浸透圧による液水移動が存在する。この時の移動は

$$\begin{aligned} q_{\ell,os} &= - \epsilon_{F\ell} \frac{D_{osm} m_k}{RT} \nabla P_{osm} = - \epsilon_{F\ell} \frac{D_{osm} m_k}{RT} \left| \frac{\partial P_{osm}}{\partial \theta} \right| \nabla \theta \\ &= - D_{\theta\ell,os} \nabla \theta \end{aligned} \quad (3-55)$$

$$D_{\theta\ell,os} = \frac{\epsilon_{F\ell} D_{osm} m_k}{RT} \left| \frac{\partial P_{osm}}{\partial \theta} \right| \quad (3-56)$$

ここで、 $\epsilon_{F\ell}$ は比例定数である。

c) 材料中の液水移動

以上、材料中の液水移動流 q_ℓ をまとめると

$$\begin{aligned} q_\ell &= q_{\ell,ka} + q_{\ell,os} = -D_{\theta\ell,ka} \nabla \theta - D_{T\ell,ka} \nabla T - D_{\theta\ell,os} \nabla \theta \\ &= - (D_{\theta\ell,ka} + D_{\theta\ell,os}) \nabla \theta - D_{T\ell,ka} \nabla T \\ &= - D_{\theta\ell} \nabla \theta - D_{T\ell} \nabla T \end{aligned} \quad (3-57)$$

$$D_{\theta\ell} = D_{\theta\ell,ka} + D_{\theta\ell,os} = \frac{2\sigma}{\rho_w^2 r^2 f_s(r)} \chi_\phi + \frac{\epsilon_{F\ell} D_{osm} m_k}{RT} \left| \frac{\partial P_{osm}}{\partial \theta} \right| \quad (3-58)$$

$$D_{T\ell} = D_{T\ell,ka} = - \frac{2}{g\rho_w r} \frac{d\sigma}{dT} \chi_\phi \quad (3-59)$$

と書ける。

(3) 熱移動

材料内における熱移動は、水分移動が存在する場合、水分移動による熱移動を考慮して

$$q_h = -\lambda \nabla T + I_v q_v + I_\ell q_\ell \quad (3-60)$$

と書ける。

(4) 熱水分同時移動の基礎微分方程式

以上の熱と水分の移動方程式をまとめると以下のごとくなる。すなわち

水分移動に対して、水蒸気と液水との流れを二相流と考え、(3-41)、(3-57) から

$$\begin{aligned} q_w &= q_v + q_\ell = -D_{\theta v} \nabla \theta - D_{Tv} \nabla T - D_{\theta \ell} \nabla \theta - D_{T\ell} \nabla T \\ &= -D_\theta \nabla \theta - D_T \nabla T \end{aligned} \quad (3-61)$$

$$\text{ただし} \quad D_\theta = D_{\theta v} + D_{\theta \ell} \quad (3-62)$$

$$D_T = D_{Tv} + D_{T\ell} \quad (3-63)$$

熱移動に対して、(3-60) で

$$q_h = -\lambda \nabla T + I_v q_v + I_\ell q_\ell \quad (3-60)$$

である。以上の熱・水分流の基礎式をもとに材料内熱水分収支をとると、

水分移動に関して、

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\nabla q_w = \nabla \cdot (D_\theta \nabla \theta + D_T \nabla T) \quad (3-64)$$

熱移動に関して

$$r_s \frac{\partial (CT)}{\partial t} = -\nabla q_h \quad (3-65)$$

ここで、

$$C = C_s + C_w \theta / r \quad (3-66)$$

(3-65) に (3-60) を代入して、 λ 、 I_v 、 I_ℓ を定数として整理すると

$$\lambda \nabla \cdot \nabla T - I_v \nabla q_v - I_\ell \nabla q_\ell = rC \frac{\partial T}{\partial t} + rT \frac{\partial C}{\partial t} \quad (3-67)$$

ここで、 $q_w = q_v + q_\ell$ であり

$$\varepsilon = \frac{q_v}{q_w} \quad (3-68)$$

とおくと

$$q_v = \varepsilon q_w \quad (3-69)$$

$$q_\ell = (1 - \varepsilon) q_w \quad (3-70)$$

また、(3-64) から

$$C_w T \frac{\partial \theta}{\partial t} = -C_w T \nabla q_w \quad (3-71)$$

(3-67) に、(3-66), (3-69)~(3-71) を代入して、 ε を定数と考え整理すると

$$\lambda \nabla \cdot \nabla T - \varepsilon (I_v - I_\ell) \nabla q_w = C_r \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3-72)$$

よって

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{C_r} \nabla \cdot \nabla T - \frac{\varepsilon}{C_r} (I_v - I_\ell) \nabla q_w \quad (3-73)$$

ここで、 $I_v = C_w T + L$, $I_\ell = C_w T$

よって $I_v - I_\ell = L$ (3-74)

結局、(3-73) は (3-64) と (3-74) を用いて

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{C_r} \nabla \cdot \nabla T + \frac{\varepsilon}{C_r} L \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (3-75)$$

となる。

以上、Luikov の理論による熱水分移動の基礎微分方程式は、(3-64), (3-75) 式で表現される。

3-4 松本の理論⁵⁾

松本は、多孔質の建築壁体内の結露過程の解析、壁体内の含水率および熱流の変化の予測を目的に圧力差によるいわゆる Bulk な流れを含む熱物質の同時移動の基礎式を導き、建築壁体の多層構造の問題を解くに適切な水分移動ポテンシャルを提示している。

すなわち、熱物質の移動する多孔質建築壁体を次のように気相、液相からなる Heterogeneous な混合物とみなし、気液相間には内部界面が存在するものとする。液相は固体実質部を分散質の一つとし、毛管水、吸着水などの液相水分および固体内の溶質などを成分とする均一混

合体であり、気相は水蒸気、乾燥空気、固体実質部の三成分からなる均一混合体である。気相、液相間には内部界面があり、内部界面を通じて熱、物質、運動量の移動が生じる。したがって、内部界面では相変化が生じている。上記のモデルにおいて、熱、物質、運動量の保存および正のエントロピー生成則より、構成関係が線型とみなせる壁体内移動問題に関する一般的な構成方程式を導いた。

ここでは、一般的な構成方程式から、固体実質以外の物質の拡散流を固体実質部に相対的な速度で表わした方程式を導き、本研究で用いる基礎式に対応する方程式が導出されているのでこれを示す。

(1) 多孔質建築壁体における熱水分の拡散方程式

ここで考えている壁体系をさらに以下のごとくモデル化する。すなわち、壁体系は、固体実質部、乾燥空気、水分の三成分とし、乾燥空気は液相に対して不活性で気相にのみ存在するものとする。したがって、系は、水蒸気、乾燥空気、固体実質部の三成分からなる気相と、液水（吸着水も含む）、固体実質部の二成分からなる液相によって構成されている。

系におけるエネルギー保存則より系全体のエントロピー収支を導き、エントロピー生成量を求める。エントロピー生成量は熱力学第二法則より正でなければならない。したがって、駆動力 (force) と流れ (flow) の関係は上述の条件を満足する関係で結合されねばならない。建築壁体での結露過程、熱の移動の過程では加えられる外部の境界条件の変化は一般に小さく、したがって壁体内の状態は平衡条件にきわめて近い状態にあると見なすことができる。したがって流れ (flow) J_a は駆動力 X_b の線型近似であるとするのが可能であると考えられる。また、考えている系は isotropic な系であると見なし、Curie の対称則が成立すると見なす。

建築壁体における物質移動の問題は主として壁体内および壁体を通過する水分量および乾燥空気である。これら水分、乾燥空気の移動する媒体は建築壁体であり、水分、温度の増加による建築壁体の膨脹を除けば壁体は剛体であると見なすことができる。また、工学的には、拡散速度は質量中心に対するよりも固体実質部に相対的な速度を用いる方が便利である。よって、ここでは固体実質部に相対的な速度で表現した構成方程式を導く。

さらに、固体実質部の速度、相間の運動量移動はそれらに共役な駆動力以外の駆動力の影響は小さいと考えられ、また、これらの固体実質部の変形や相間応力は熱水分の拡散現象に対して独立に取り扱えるものとする、熱水分の拡散を表現する流れ (flow) と駆動力 (force) との構成方程式は次式となる。

$$\left. \begin{aligned} [\mathbf{J}] &= [\mathbf{C}_{ij}] [\mathbf{F}] \\ [\mathbf{J}] &= [q_h, q_v, q_a, q_\ell]^T \\ [\mathbf{F}] &= -[\nabla_{\ell n} T, \nabla_T \mu'_v, \nabla_T \mu'_a, \nabla_T \mu'_\ell]^T \end{aligned} \right\} \quad (3-76)$$

ここで

$$\nabla_T \mu' = \nabla_T \mu - F = \nabla \mu + S \nabla T - F \quad (3-77)$$

と記号している。

また、内部の相間界面における関係は

$$J_{w(12)} = \beta (\mu_v - \mu_\ell) \quad (3-78)$$

ここで、1, 2, v, a, ℓ は気相, 液相, 水蒸気, 乾燥空気, 液を意味する。

(2) 多孔質建築壁体における熱物質移動ポテンシャルと拡散方程式

気相内の湿り空気は、十分な精度で完全ガスと見なすことができる。したがって、気相内の水蒸気分圧, 乾燥空気分圧をそれぞれ p_v , p_a , 全圧を $P (\equiv P_g)$ と表わすと、水蒸気, 乾燥空気ポテンシャル μ_v , μ_a は

$$\left. \begin{aligned} \mu_v &= \mu_{v0}(T, P) + \mu_{1v} \\ \mu_{1v} &= R_w T \ell_n \frac{p_v}{P} \\ \mu_{v0} &= \mu_v^0(T) + R_w T \ell_n P \end{aligned} \right\} \quad (3-79)$$

$$\left. \begin{aligned} \mu_a &= \mu_{a0}(T, P) + \mu_{1a} \\ \mu_{1a} &= R_a T \ell_n \frac{p_a}{P} \\ \mu_{a0} &= \mu_a^0(T) + R_a T \ell_n P \end{aligned} \right\} \quad (3-80)$$

μ_{v0} , μ_{a0} はそれぞれ温度 T , 圧力 P の水蒸気および乾燥空気の化学ポテンシャルである。液相の水分ポテンシャル μ_ℓ は自由水の飽和水蒸気圧 $p_s(T)$, μ_ℓ に平衡する蒸気圧を p_v^2 として

$$\left. \begin{aligned} \mu_\ell &= \mu_{\ell 0}(T, P) + \mu_{2\ell} \\ \mu_{2\ell} &= R_w T \ell_n \frac{p_v^2}{p_s(T)} \end{aligned} \right\} \quad (3-81)$$

ここに、 $\mu_{2\ell}$ は自由水の化学ポテンシャルである。平衡状態では $\mu_v = \mu_\ell$ であるから (3-79) の代りに (3-81) の形で表現することができる。これらの関係を用いて、

$$\begin{aligned}\nabla_T \mu'_v &= \nabla_T \mu_{v0} + \nabla_T \mu_{1v} - F_w = v_v \nabla P - F_w + \nabla_T \mu_{1v} \\ &= \nabla_T \mu_{\ell 0} + \nabla_T \mu_{1\ell} - F_w = v_\ell \nabla P - F_w + \nabla_T \mu_{1\ell}\end{aligned}\quad (3-82)$$

$$\begin{aligned}\nabla_T \mu'_\ell &= \nabla_T \mu_{v0} + \nabla_T \mu_{2v} - F_w = v_v \nabla P - F_w + \nabla_T \mu_{2v} \\ &= \nabla_T \mu_{\ell 0} + \nabla_T \mu_{2\ell} - F_w = v_\ell \nabla P - F_w + \nabla_T \mu_{2\ell}\end{aligned}\quad (3-83)$$

$$\nabla_T \mu'_a = \nabla_T \mu_{a0} + \nabla_T \mu_a - F_a = v_a \nabla P - F_a + \nabla_T \mu_a \quad (3-84)$$

ただし,

$$v_v = \frac{R_w T}{P}, \quad v_a = \frac{R_a T}{P}, \quad v_\ell = \frac{1}{\rho_\ell} \quad (3-85)$$

また, Gibbs-Duhem の関係から

$$\nabla_T \mu_a = \frac{1}{\rho_a} \nabla P - \frac{\rho_\ell}{\rho_a} \nabla_T \mu_v = \frac{R_a T}{P - p_v} \nabla P - \frac{R_a}{R_w} \frac{p_v}{P - p_v} \nabla_T \mu_v \quad (3-86)$$

また, 化学ポテンシャルの定義より

$$\nabla_T \mu_v = \nabla \mu_v + S_v \nabla T \quad (3-87)$$

$$\nabla_T \mu_\ell = \nabla \mu_\ell + S_\ell \nabla T \quad (3-88)$$

ただし, S_v, S_ℓ は水蒸気, 液の部分比エントロピーである。(3-76) に (3-82) ~ (3-88) を代入して整理すると拡散方程式は次のように書ける。

$$\left. \begin{aligned} [\mathbf{J}] &= [\mathbf{D}_{ij}] [\mathbf{Fe}] \\ [\mathbf{J}] &= [q_h, q_v, q_a, q_\ell]^T \\ [\mathbf{Fe}] &= -[\nabla T, \nabla \mu_{1\ell} - F_w, \nabla P, \nabla \mu_{2\ell} - F_w]^T \end{aligned} \right\} \quad (3-89)$$

(3-89) は水分ポテンシャルとして自由水基準の化学ポテンシャルを用いた。全く同様にし、純水蒸気基準の化学ポテンシャルを用いた拡散方程式を導くことができる。このときは、 $\mu_{1\ell}$ の代りに μ_{1v} を、 v_ℓ の代りに v_v を、また部分比エントロピーには液水の代りに蒸気のそれを用いればよい。両者は等価であるが、液水による水分移動が支配的な場合、例えば結露の生じる系では自由水基準の化学ポテンシャルを、気相の水蒸気移動が支配的な場合には水蒸気基準の化学ポテンシャルを用いる方が、係数の T, μ の依存性が少なく適当である。

次に、壁体内の含水率が飽和状態に近い状態を除けば、液相における物質流れと気相における流れの結合は小さいと見られる。この場合には、(3-76) の係数は次のようになる。

$$C_{24} = C_{34} = C_{42} = C_{43} = 0 \quad (3-90)$$

このとき、(3-89) の係数 D_{ij} は

$$D_{24} = D_{34} = D_{42} = 0, \quad D_{43} \approx 0 \quad (3-91)$$

したがって、重力項を無視すると

熱流に対して

$$q_h = -D_{11}\nabla T - D_{12}\nabla\mu_{1\ell} - D_{13}\nabla P - D_{14}\nabla\mu_{2\ell} \quad (3-92)$$

ここで、 D_{12} は気体の拡散の熱効果、いわゆる Dufour 効果の係数であり、気体内拡散理論よりきわめて小さいことが知られている。 D_{13} , D_{14} は固体実質部と液相水分の相互作用による項であり、今後研究の必要な領域であると考えられるが、液体相において Dufour 効果が見出されていないこと、現在の熱伝導率の測定精度はそれ以前の問題、含水率による D_{11} への影響すら十分明らかにされていないのできわめて低いことから D_{13} , D_{14} は実用的に一応零としてよいだろう。したがって、

$$q_h = -D_{11}\nabla T \quad (3-93)$$

としてよいと考えられる。 D_{11} は我々の記号で言えば λ である。すなわち、

$$q_h = -\lambda\nabla T \quad (3-94)$$

水蒸気移動に対して

$$q_v = -D_{21}\nabla T - D_{22}\nabla\mu_{1\ell} - D_{23}\nabla P \quad (3-95)$$

乾燥空気の移動に対して

$$q_a = -D_{31}\nabla T - D_{32}\nabla\mu_{1\ell} - D_{33}\nabla P \quad (3-96)$$

液水移動に対して

$$q_\ell = -D_{41}\nabla T - D_{43}\nabla P - D_{44}\nabla\mu_{2\ell} \quad (3-97)$$

と書ける。

(3) 含水率勾配による拡散方程式の表現

含水率 θ は固体実質部の変形がないとすると、状態方程式すなわち平衡含水率曲線により

$$\mu = g(\theta, T) \quad (3-98)$$

の関係がある。したがって、

$$\nabla\mu = \frac{\partial g}{\partial \theta}\nabla\theta + \frac{\partial g}{\partial T}\nabla T \quad (3-99)$$

この関係を，(3-95)，(3-96)，(3-97)に使用すると，物質移動に対する含水率勾配による拡散方程式が得られる。

水蒸気移動に対して

$$q_v = - \left(D_{21} + D_{22} \frac{\partial g(\mu_v)}{\partial T} \right) \nabla T - D_{22} \frac{\partial g(\mu_v)}{\partial \theta} \nabla \theta_1 - D_{23} \nabla P \quad (3-100)$$

乾燥空気の移動に対して

$$q_a = - \left(D_{31} + D_{32} \frac{\partial g(\mu_v)}{\partial T} \right) \nabla T - D_{32} \frac{\partial g(\mu_v)}{\partial \theta} \nabla \theta_1 - D_{33} \nabla P \quad (3-101)$$

液水移動に対して

$$q_\ell = - \left(D_{41} + D_{44} \frac{\partial g(\mu_\ell)}{\partial T} \right) \nabla T - D_{44} \frac{\partial g(\mu_\ell)}{\partial \theta} \nabla \theta_2 - D_{43} \nabla P \quad (3-102)$$

ここで，局所平衡の場合には

$$\left. \begin{aligned} q_w &= q_v + q_\ell = - \left\{ D_{21} + D_{41} + (D_{22} + D_{44}) \frac{\partial g}{\partial T} \right\} \nabla T \\ &\quad - \left\{ (D_{22} + D_{44}) \frac{\partial g}{\partial \theta} \right\} \nabla \theta - (D_{23} + D_{43}) \nabla P \\ q_g &= q_v + q_a = - \left\{ D_{21} + D_{31} + (D_{22} + D_{32}) \frac{\partial g}{\partial T} \right\} \nabla T \\ &\quad - \left\{ (D_{22} + D_{32}) \frac{\partial g}{\partial \theta} \right\} \nabla \theta - (D_{23} + D_{33}) \nabla P \\ q_h &= -D_{11} \nabla T \end{aligned} \right\} \quad (3-103)$$

(4) 熱水分同時移動の基礎微分方程式

固体実質部の変形のない場合の変化方程式は

水蒸気に対して

$$\frac{\partial \theta \rho_v}{\partial t} = -\nabla \cdot q_v + \beta(\mu_{2\ell} - \mu_{1\ell}) \quad (3-104)$$

乾燥空気に対して

$$\frac{\partial \theta \rho_a}{\partial t} = -\nabla \cdot q_a \quad (3-105)$$

液水に対して

$$\frac{\partial (\theta_0 - \theta) \rho_w}{\partial t} = -\nabla \cdot q_\ell + \beta (\mu_{1\ell} - \mu_{2\ell}) \quad (3-106)$$

温度に対して、気相の水蒸気、乾燥空気の流れによる熱の正味移動は建築壁体内の圧力勾配 ∇P が一般に小さいために他の項に比し小さく無視することにより

$$C\rho = \frac{\partial T}{\partial t} + C_\ell q_\ell \nabla T = -\nabla q_h + (I_\ell - I_v) \beta (\mu_{2\ell} - \mu_{1\ell}) \quad (3-107)$$

ここで、状態方程式は、気相内の水蒸気、乾燥空気に対して完全ガスと見なせるから

$$\rho_v = \frac{p_v}{R_w T} \quad (3-108)$$

$$p_v = p_s(T) \exp \left[\frac{\mu_{1\ell}}{R_w T} \right] = P \exp \left[\frac{\mu_v - \mu_{v0}}{R_v T} \right] \quad (3-109)$$

$$\rho_a = \frac{p_a}{R_w T} \quad (3-110)$$

$$p_a = P - p_v \quad (3-111)$$

液水に対しては

$$\rho_w = \rho_w(T, P_2, \mu_\ell) = \rho_w(T, P_2, P, \mu_{2\ell}) \doteq \text{一定} \quad (3-112)$$

平衡含水率関係（平衡等温吸水曲線）より、履歴の影響がないものとする

$$\theta_0 - \theta \doteq f(\mu_{2\ell}, T) \quad (3-113)$$

水蒸気、乾燥空気、液水、温度に対する基礎微分方程式は、(3-104)～(3-107)に(3-93)～(3-97)を代入して得られる。

3-5 解析に用いる熱水移動の基礎微分方程式

前節までに、従来の熱水分移動に関する代表的な研究を述べてきた。ここでは、これらの基礎式をもとに本研究で検討しようとする基礎微分方程式を示す。

ここで述べる基礎式は、移動ポテンシャルを温度と含水率により表現するもので、従来の研究において提示された要素をすべて含んだ基礎式から導出される。この導出は松本³⁶⁾により整理されたものである。

すなわち、固体実質部の変形がなく、Bulk flow もない状態のもとで、材料内部を空隙と実質部とで構成されているものとし、空隙では水蒸気で、実質部では吸着水または毛管水で水分が移動するという二相流モデルを考える。

空隙内水蒸気流はすでに見てきたごとく水蒸気濃度差によって表現できるから

$$q_v = -k_v \nabla X \quad (3-114)$$

実質部を流れる吸着あるいは毛管水の流れは、重力項を無視すると温度と含水率の勾配で表現して

$$q_\ell = -D_{\theta\ell} \nabla \theta - D_{T\ell} \nabla T \quad (3-115)$$

材料内の熱移動は

$$q_h = -\lambda \nabla T \quad (3-116)$$

と表現される。

材料内の熱と水分の収支を相間の相変化を考慮してとると

水蒸気移動の式は

$$a r_g \frac{\partial X}{\partial t} = \nabla \cdot (k_v \nabla X) + \alpha'_i S (X_i - X) \quad (3-117)$$

液水移動の式は

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{\theta\ell} \nabla \theta) + \nabla \cdot (D_{T\ell} \nabla T) + \alpha'_i S (X - X_i) \quad (3-118)$$

熱の移動の式は

$$C r \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + L \alpha'_i S (X - X_i) \quad (3-119)$$

非定常状態でも定常状態と同様、材料内実質部表面における温度、絶対湿度と含水率の関係が平衡含水率曲線によって示されるとすると、その関係は

$$\theta = f(X_i, T) \quad \text{または} \quad X_i = g(\theta, T) \quad (3-120)$$

と表わされる。

境界条件式は、水分移動に対して

$$[-k_v \nabla X]_B = \alpha' S_v (X_r - X_B) \quad (3-121)$$

$$[-D_{\theta\ell} \nabla \theta - D_{T\ell} \nabla T]_B = \alpha' S_L (X_r - X_B) \quad (3-122)$$

熱移動に対して

$$[-\lambda \nabla T]_B = \alpha (T_r - T_B) - L [D_{\theta\ell} \nabla \theta + D_{T\ell} \nabla T]_B \quad (3-123)$$

以上の(3-117)～(3-119)は局所非平衡の場合であり、松本の(3-104)、(3-106)、

(3-107) に対応する。

ここで、局所平衡の仮定を用いると、すなわち $\alpha_i' = \infty$ の場合

$$X_i = X = g(\theta, T) \quad (3-124)$$

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial X}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial X}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3-125)$$

である。今、(3-117) と (3-118) とから

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{\theta\ell} \nabla \theta) + \nabla \cdot (D_{T\ell} \nabla T) - a\gamma_g \frac{\partial X}{\partial t} + \nabla \cdot (k_v \nabla X) \quad (3-126)$$

(3-125) の関係を上式に代入して整理すると、水分移動に関する基礎微分方程式が得られる。

すなわち

$$\begin{aligned} & \left(1 + a\gamma_g \frac{\partial g}{\partial \theta}\right) \frac{\partial \theta}{\partial t} + \left(a\gamma_g \frac{\partial g}{\partial T}\right) \frac{\partial T}{\partial t} \\ &= \nabla \cdot \left[\left(k_v \frac{\partial g}{\partial \theta} + D_{\theta\ell}\right) \nabla \theta\right] + \nabla \cdot \left[\left(k_v \frac{\partial g}{\partial T} + D_{T\ell}\right) \nabla T\right] \\ &= \nabla \cdot (D_\theta \nabla \theta) + \nabla \cdot (D_T \nabla T) \end{aligned} \quad (3-127)$$

ここで

$$D_\theta = D_{\theta v} + D_{\theta\ell} = k_v \frac{\partial g}{\partial \theta} + D_{\theta\ell} \quad (3-128)$$

$$D_T = D_{Tv} + D_{T\ell} = k_v \frac{\partial g}{\partial T} + D_{T\ell} \quad (3-129)$$

である。

また、同様に熱移動に対する基礎微分方程式は

$$\begin{aligned} & (Cr + La\gamma_g \frac{\partial g}{\partial T}) \frac{\partial T}{\partial t} + (La\gamma_g \frac{\partial g}{\partial \theta}) \frac{\partial \theta}{\partial t} \\ &= \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + L \nabla \cdot (D_{\theta v} \nabla \theta + D_{Tv} \nabla T) \end{aligned} \quad (3-130)$$

と表わされる。

境界条件は

$$[-D_\theta \nabla \theta - D_T \nabla T]_B = \alpha'(X_r - X_B) \quad (3-131)$$

$$[-\lambda \nabla T]_B = \alpha(T_r - T_B) - L(D_{\theta\ell} \nabla \theta + D_{T\ell} \nabla T) \quad (3-132)$$

以上のごとく、本研究において検討すべき熱水分同時移動の基礎微分方程式と境界条件は(3-127), (3-130) および (3-131), (3-132) である。

ここで、Philip and de Vries の式は、(3-127), (3-130) において

$$a\tau_g = 0 \quad (3-133)$$

としたものに対応し，Luikov の式は， $a\tau_g = 0$ とし，さらに

$$\epsilon = \frac{D_{\theta v} \nabla \theta + D_{Tv} \nabla T}{\frac{\partial \theta}{\partial t}} \quad (3-134)$$

なる ϵ および熱伝導率入を定数とおいたものに対応している。

3-6 第3章のまとめ

本章では，まず本研究で解析に用いる熱水分同時移動方程式の根拠となるべき従来の熱水分同時移動方程式として，Philip and de Vries の理論，Luikovの理論，松本の理論について述べた。そして，最後に，本研究で用いる熱水分同時移動方程式を示した。

この基礎式は，松本によって定式化されたもので，局所平衡の仮定において，移動ポテンシャルとして含水率と温度を用いて表現したものである。

第 4 章 軟質繊維板の構造とその特性

4-1 はじめに

我々が問題としているのは、建築における結露問題であり、建築に使用される材料内の水分蓄積の挙動を明らかにすることが目的である。建築に用いられる材料は種々多様であるけれども、材料特性としてはほとんど空隙材料と見なせる。我々は本研究に用いる材料として軟質繊維板を選んだ。ここでは、この材料の選択理由およびその構造と特性を述べる。

4-2 軟質繊維板の選択理由

建築材料内の水分蓄積の挙動を調べるため、以下の条件を満足する材料を選んだ。

- 1) 独立気泡でない空隙建築材料
- 2) 材料内含水率分布を調べるために分割が容易な材料
- 3) 親水性の材料
- 4) 水分移動は熱移動に比して長時間かかるので、出来るだけ水分移動が速い材料
- 5) 一様な空隙分布を示す材料

以上の条件を満足する材料として、軟質繊維板を選んだ。以下にこの材料の特性を述べる。

4-3 軟質繊維板の構造

使用した軟質繊維板は厚さ 8.5 mm (熱伝導率測定には同質の繊維板で 9.0 mm を使用) の木質繊維よりなる充填成型材である。この繊維板は要易に繊維質に分解できる。ピンセット等で軽く分離すると、大約 1×10^{-2} mm ϕ 程度を中心とした繊維質が見い出せる。さらに細く見ると、これら繊維質はより微細な繊維質より構成されていることが知れる。

この軟質繊維板は成型過程において、発水性の液とともに作られているものがあるが、本研究において用いた繊維板は親水性のものである。

4-4 熱伝導率^{71,73)}

熱伝導率は材料内に水分が蓄積されるにつれて大きくなってゆく。この含水率による熱伝導率の変化については後述する(6-7)。ここでは、気乾状態(RH 75%)における測定結果を示す。測定法は後述のごとく周期法である。

$$\lambda = 0.062 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C} \quad (4-1)$$

4-5 空隙率

空隙率の測定は以下のごとく行なった。すなわち、試料の体積をあらかじめ測定した後(V)、この試料を繊維の状態までほぐす。そして一定体積の水の中に入れ体積増加を測定する(V_m)、この結果、空隙率 a は

$$a = \frac{V - V_m}{V} = 0.65 \text{ m}^3/\text{m}^3 \quad (4-2)$$

4-6 湿気伝導率

湿気伝導率は、ハイグロスコピックの範囲内において、材料内での水分移動が水蒸気のみと考えた時の移動係数 k_v であり、

$$q_v = -k_v \nabla X \quad (4-3)$$

で表わされる。図4-1に、この湿気伝導率測定装置を示す。装置は恒温室内に入れ一定温度のもとに測定した。槽内の湿度は飽和塩水溶液を用いて一定湿度に保った。湿度一定の確認はミニマ鋭感温湿度計によった。槽内温度は0.15mmφのCu-Co熱電対で各槽3点測定した。温度測定の結果、槽内温度

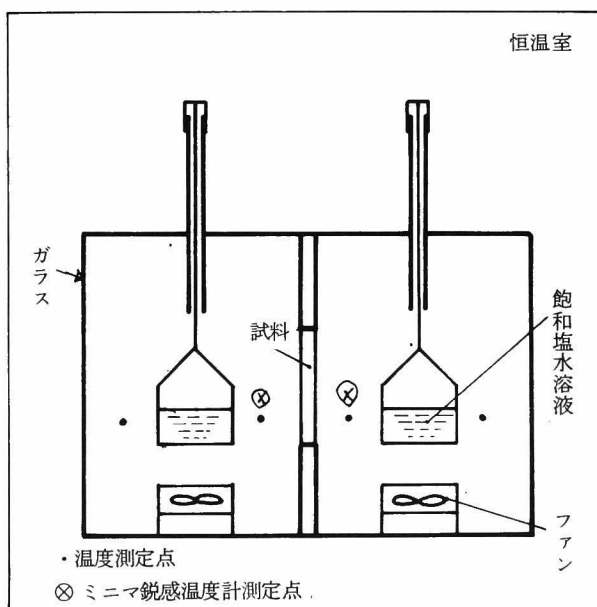


図4-1. 透湿率測定装置

の一樣性、および各槽の温度の等しいことが確認された。温度は 20℃ になるようにセットされている。

測定に使用した飽和塩と測定順序を表 4-1 に示す。両槽内の湿気伝導率の影響は結果に対

表 4-1 湿気伝導率測定条件とその結果

測定 No.	槽（右）内条件				槽（左）内条件				平均 含水率 (kg/kg)	湿気伝導率 (kg/mhkg/kg)
	飽和塩	相対湿度 (RH%)	絶対湿度 ($\times 10^{-3}$ kg/kg)	含水率 (kg/kg)	飽和塩	相対湿度 (RH%)	絶対湿度 ($\times 10^{-3}$ kg/kg)	含水率 (kg/kg)		
1	$\text{ZnCl}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$	10.0	1.49	0.000	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	33.1	4.92	0.046	0.023	0.01855
2	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	52.1	7.74	0.061	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	33.1	4.92	0.046	0.053	0.01898
3	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	52.1	7.74	0.061	NaCl	77.1	11.45	0.085	0.073	0.01948
4	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	92.4	13.72	0.152	NaCl	77.1	11.45	0.085	0.118	0.02298

して 2～3% 以下であるため無視した。測定結果を表 4-1 および図 4-2 に示す。

4-7 材料の空隙分布の一樣性

材料の空隙分布の一樣性を確認するために、以下の実験を行なった。すなわち、最初試料を飽水させた後、恒温恒湿槽（20℃, RH 92.4% ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 飽和塩)）の中で所定の平均含水率になるまでゆっくりと乾燥させる。後にスーパーシーラントとパラフィンにより全面断湿する。これと同じ恒温恒湿槽内に入れ、十分平衡に達する

まで放置する。その後、試料を取り出し含水率分布を測定した。その結果を図 4-3 に示す。各平均含水率に対してほぼ一樣な含水率分布を示しており、材料の空隙分布は一樣と見なして良いであろう。

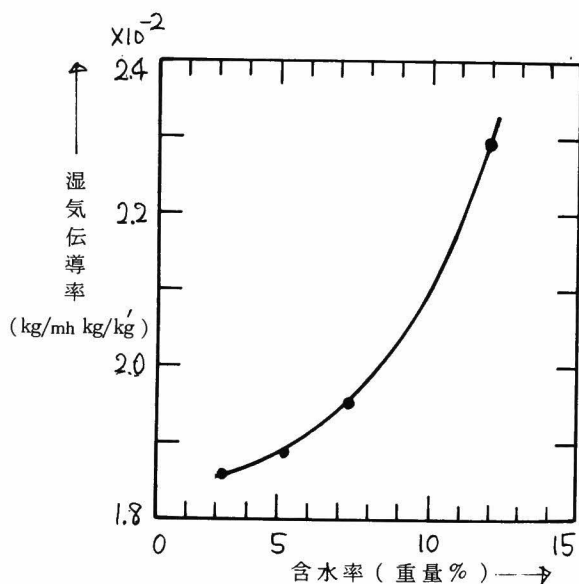


図 4-2 湿気伝導率

4-8 平衡含水率曲線

平衡含水率測定装置を図4-4に示す。装置全体は恒温室の中に入れられる。一定湿度は飽和塩水溶液によって得た。測定に使用した飽和塩は4-6の湿気伝導率の測定に使用した5種類である。空隙材料の平衡含水率曲線は絶乾状態からの吸湿と飽和状態からの放湿の二種類の過程があるが、今回は吸湿過程のみ測定を行なった。

高相対湿度（RH 95 %以上）における測定は僅かな温度変化によっても材料への結露が生じる問題があり困難である。したがって、今回用いた装置においては上に述べた種類の飽和塩に対応する相対湿度しか求めている。

RH 100 % に対応する含水率は理論的に言えば材料の空隙をすべて満たした飽水状態に対応する。この値は、4-5の空隙率と材料の密度から270重量%である。

後に分るように、熱水分同時移動方程式を検討するためには高相対湿度部分も含めた平衡含水率曲線が重要な物性値となる。理論の検討には、この高相対湿度部分を内挿により得て使用した。しかし、含水率に相当の差があること、実際上は飽水含水率よりかなり少ない含水率でほぼRH 100 %になると思われることから、次の試みを行なっている。すなわち、乾燥過程において、恒率乾燥から第1段減率乾燥に移る含水率いわゆる限界含水率は見かけ上RH 100 %に対応するであろう。そこで、出来るだけ乾燥速度を低くして求めた結果、約60重量%程度であった^{61,63)}。しかし、この含水率は、乾燥条件によっても変化するため、材料の物性値とはなり得ないからこの含水率は参考として使用した。

4-9 第4章のまとめ

建築における結露問題を取扱うための実験材料の選択理由を述べ、本研究に用いた軟質繊維板がこの選択理由に適するものであるかを検討し、十分実験材料として満足のゆくものである

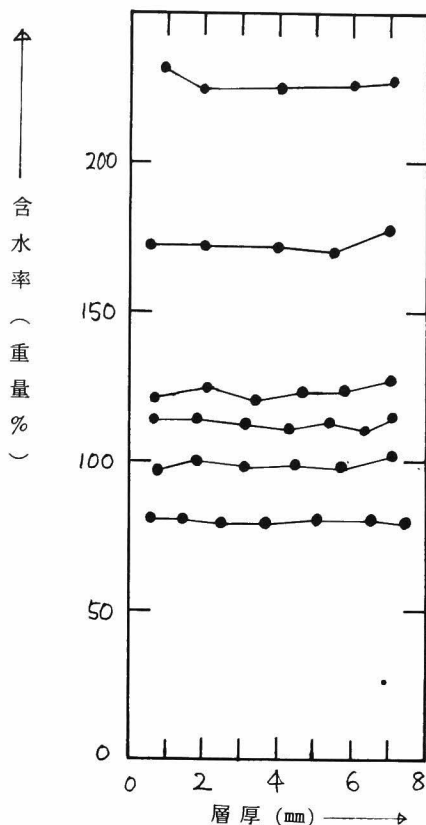


図4-3 材料内空隙分布の一樣性

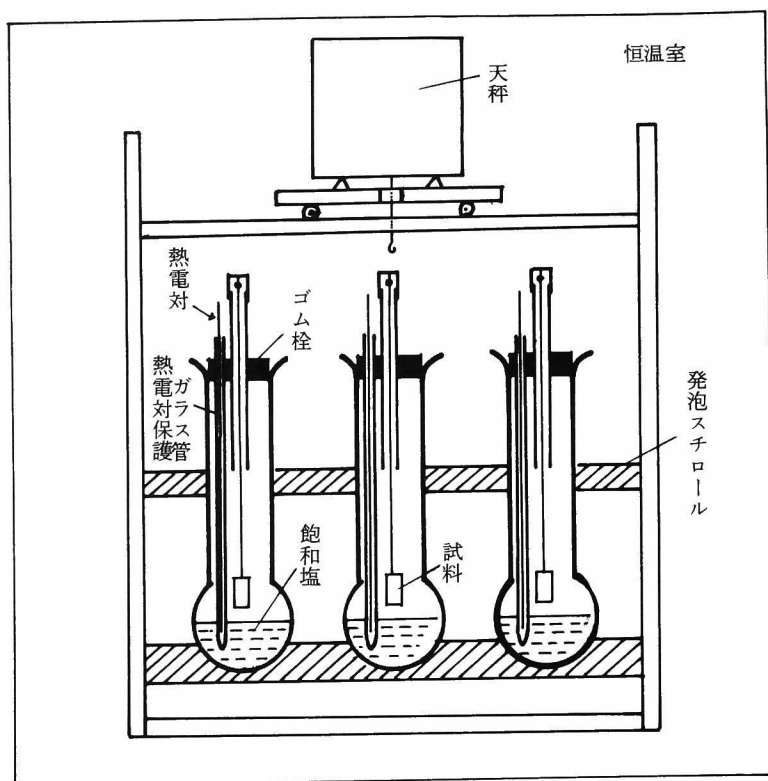


図 4-4 平衡含水率測定装置

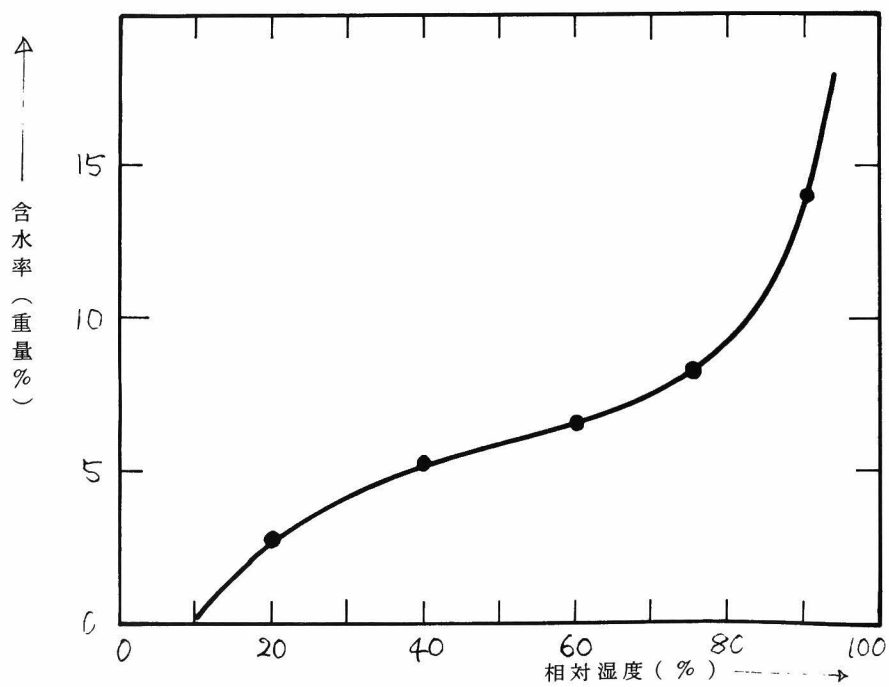


図 4-5 平衡含水率

ことが分った。

また、材料の基本的な特性である熱伝導率，空隙率，湿気伝導率，平衡含水率曲線を求めた。

第 5 章 実 験^{58~60, 62, 64)}

5-1 はじめに

我々の問題である結露障害防止のためには、材料に結露した水分の蓄積状況の変化および蒸発時の放湿状況の変化を知る必要がある。しかし、この現象は材料内での熱と水分の同時移動の現象であり、さらに温度と含水率により移動特性も大きく変化する。したがって、材料の種類、すなわち材料の空隙特性の違いや、内外温湿度の時間変動によって材料内の挙動は複雑に変化するため、この現象を容易に明らかにすることはできない。複雑な現象であるため、種々の条件下での実態を正確に求めることにより水分蓄積の機構を把握することは重要なことと思われる。また、第3章において述べたごとく結露現象を予測するための熱水分同時移動方程式の基礎式は種々提示され検討されているがまだ確立されているとは言えない。この原因は、実際の水分蓄積の状況を正確に知ることが実験上非常に困難であること、さらに、基礎式に現われる移動係数の同定が困難であることによるとと思われる。

したがって、この章においては、以下の二点について検討を加える。

まず第一点として、種々の結露および蒸発過程のもとで、材料内に実際どのような水分蓄積が生じるかを正確に調べる。この結果をもとに、結露あるいは蒸発状態における特徴、およびこの特徴の原因を明らかにすることによって結露障害防止に寄与する事項を整理する。

第二は、結露現象を十分予測し得る熱水分同時移動方程式を確立するためのデータを得ることである。第6章では、移動方程式に現われる移動係数を求めているが、この移動係数は温度と含水率によって大きく変化するから、この性質をもった方程式の検討が行なえるように実験条件を考慮する。

実験は大別して、内部結露、表面結露、結露－蒸発過程の三種類について行なった。内部結露は特に熱水分同時移動方程式の検討に、その他は現象の把握および内部結露過程との差違についての検討に用いた。

5-2 実験装置^{58, 62)}

実験装置を図5-1に示す。これは以下の三つの部分より構成されている。すなわち、側下面が保温された銅箱、図5-2に示す試料板、さらに側面ガラスで上面アルミ板の下面開放の

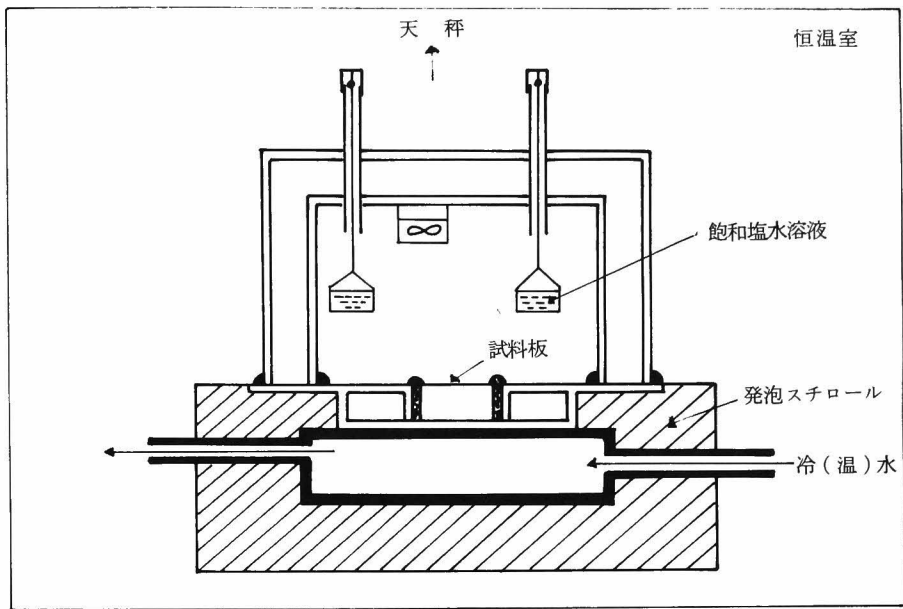


図 5-1 実験装置

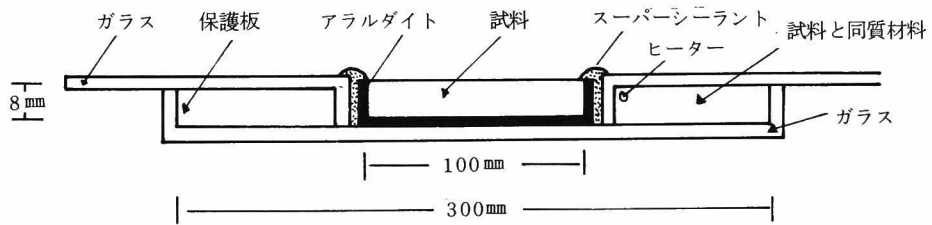


図 5-2 試料板

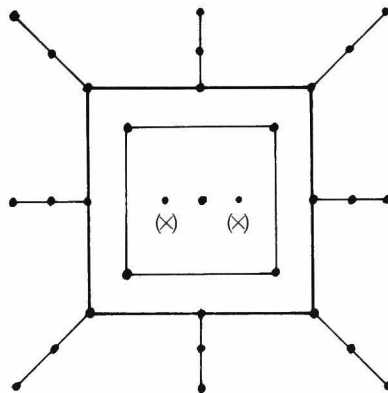


図 5-3 熱電対取付位置

二重槽である。これらは各実験毎に重ねられる。重ねた部分はスーパーシーラントで接着防湿する。

試料板は図5-2に示すごとく、試料と同質の材料30 cm角よりなる保護板の中央に10 cm角の試料を置いたものである。保護板の全面には吸放湿を防ぐためガラスが接着されている。試料と保護板との密着は側面にスーパーシーラントを充填することによって行なった。このスーパーシーラントは密着防湿以外に、実験終了後試料全体が取り除けることができる接着剤であることから用いられた。このように、試料を取り除けるようにしたことにより、同一条件下のもとで経過時間の異なる材料内水分蓄積の挙動を知ることができた。密着部分における温度降下を調整するため保護板側上部にヒーターを取り付けている。

試料は厚さ約8.5 mmで、側・下面をアラルダイトで断湿されている。アラルダイトの断湿のため、実際の水分蓄積が行なわれる試料厚さは約8.0 mmとなる。試料下面断湿側の温度は銅箱中に所定の温度の水を循環させることにより制御される。試料上部は所定の温度に制御された二重槽内の空気に接している。この槽内空気温は実験装置全体を恒温室の中に入れ、恒温室の温度を制御することにより一定に保たれる。槽内湿度は飽和塩水溶液を用いて一定湿度に保ち、この一定湿度の確認はミニマ鋭感温湿度計により行なった。温度測定は0.08 mm ϕ のCu-Co熱電対を使用した。温度測定点を図5-3に示す。

材料の熱伝導率は含水率とともに大きく変化する。この影響を調べるために、実験の一つは材料内に熱電対(0.08 mm ϕ , Cu-Co)を側面から水平に挿入して行なっている。熱電対挿入位置を図5-3に(×)印で示す。

5-3 実験方法

結露過程の実験手順は以下のごとくである。試料は最初循環水温と槽内温とを同一にすることにより一定温湿度に平衡させる。平衡を確認した後、循環水の温度を降下させ結露状態にする。以後の材料内への吸湿量は飽和塩水溶液の重量変化を測定することにより得る。

含水率分布は以下のようにして求めた。すなわち、所定の時間経過後、試料板上方の槽を取りはずし、試料をカッターで数分割する。この小片を厚さ方向にさらに数分割する。測定中の蒸発を防ぐため密閉性のよい小瓶に入れ重量測定する(m_t)。この試料を恒温恒湿槽(RH 10%)の中で乾燥させ重量を測定する(m_d)。この測定により含水量($m_w = m_t - m_d$)を求め、含水率(重量%)($\theta = m_w / m_d \times 100$)を算出する。

同一条件下における含水率分布の時間経過は、同一条件下の実験を経過時間のみ変えて数回

行なうことにより求めた。

5-4 実験結果とその考察

5-4-1 実験条件

実験条件を表5-1, 図5-4~5-10に示す。図は実験条件を比較するもので、実験の初期の状態を示した。

表5-1 実験条件

実験の種類の種類	過程の種類	実験条件の種類	実験No.	槽内温度℃	高温側表面温℃	低温側表面温℃	槽内温度		露点温度℃	露点位置	経過時間時	飽和塩減少量g	洩れ量mg/h	吸湿量g	終了時含水量g	回収率%
							RH %	X $\times 10^{-3}$ kg/kg'								
結露過程	内部結露	A	1	18.6	16.2	5.4	54.4	7.37	9.2	1/2	92	3.79	0	3.79	3.23	85.3
			2	18.8	16.7	5.0	"	7.49	9.5	"	296	10.62	6	8.85	7.25	82.0
		B	3	20.8	19.1	9.6	75.5	11.78	16.4	1/4	28	3.57	15	3.29	3.14	95.7
			4	20.5	18.6	9.6	"	11.54	16.1	"	48	5.94	"	5.50	5.42	98.5
			5	20.5	18.6	9.6	"	11.54	16.1	"	100	11.22	16	10.42	10.31	98.9
			6	20.3	18.5	9.6	"	11.40	15.9	"	165	16.73	15	14.95	14.27	95.5
			7	20.8	18.9	9.8	"	11.78	16.4	"	165					
		C	8	28.5	22.8	5.2	47.9	11.98	16.7	1/4	68	9.76	5	9.42	9.06	96.2
	表面	D	9	20.3	15.5	3.3	75.5	11.40	15.9	表面	192	37.06	10	35.14	33.34	94.8

結露・蒸発過程	結露	E	10	19.6	17.7	10.0	75.5	10.88	15.2	1/4	267	15.06	15	11.05
	蒸発			22.0	21.8	20.8	〃	12.67			214			
	結露		11	19.4	17.7	9.8	75.5	10.75	15.1	1/4	98	11.01	15	9.54
	蒸発			24.6	25.4	28.5	〃	14.89			93			
	結露		12	19.6	17.9	10.2	75.5	10.88	15.2	1/4	96	10.59	15	9.15
	蒸発			21.0	20.1	17.2	〃	11.89			236			

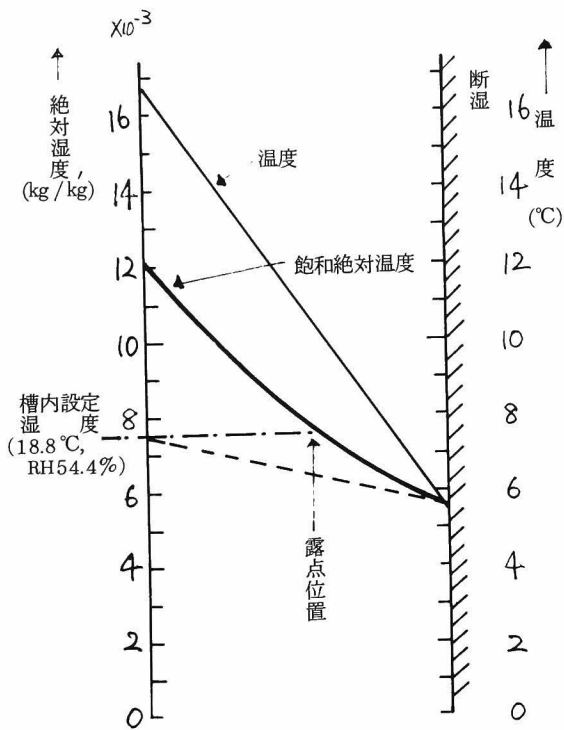


図 5-4 実験A 設計条件

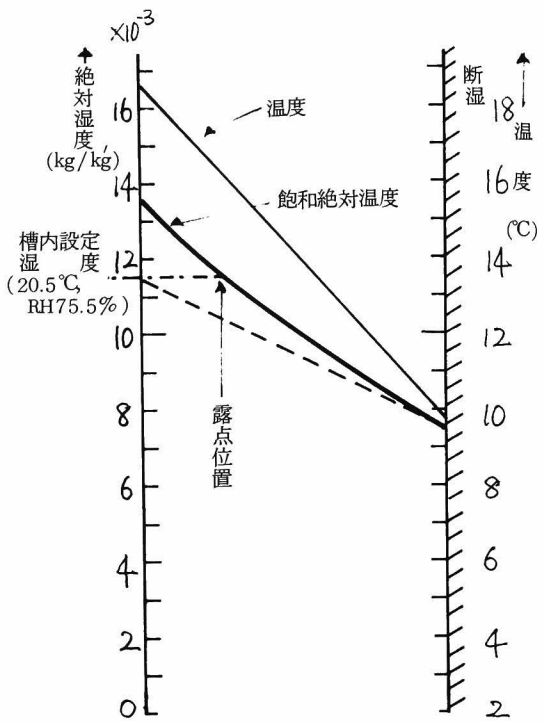


図 5-5 実験B 設計条件

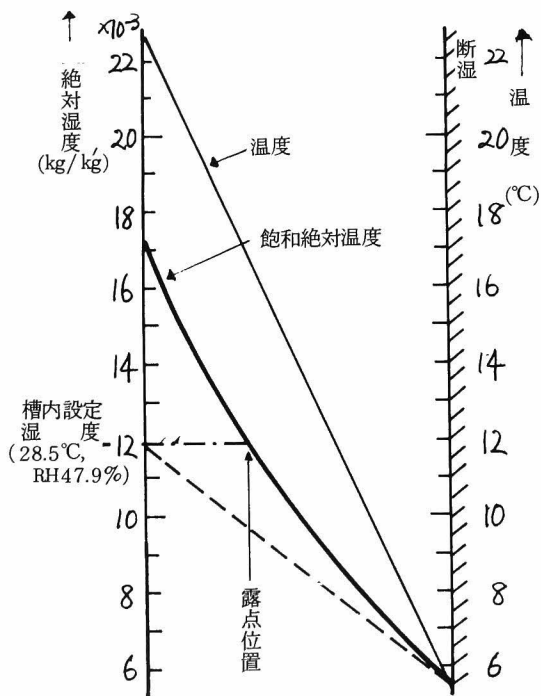


図 5-6 実験C 設計条件

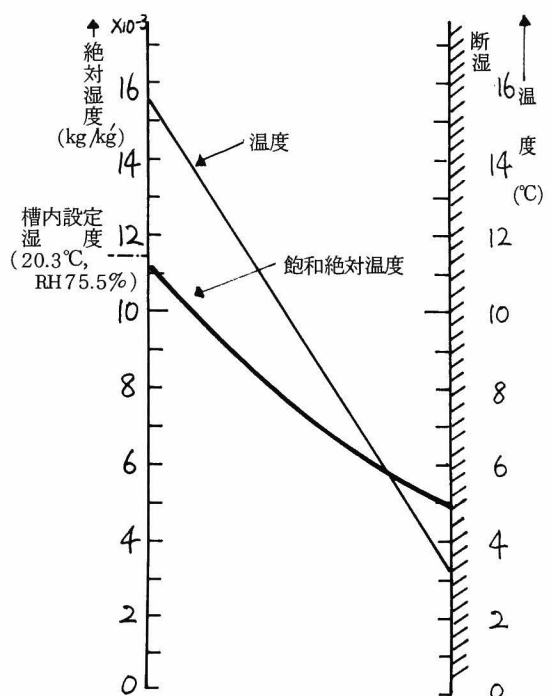


図 5-7 実験D 設計条件

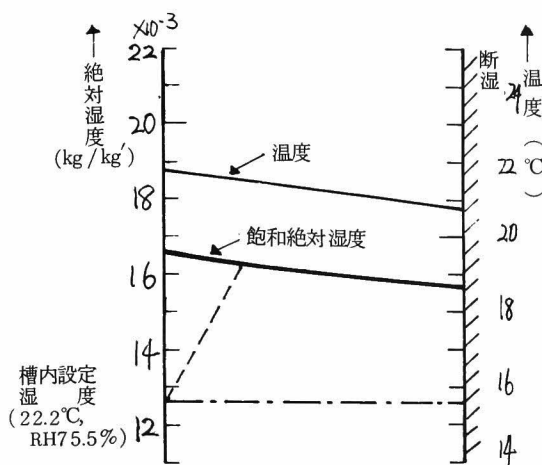


図 5-8 実験 E-10 設件条件

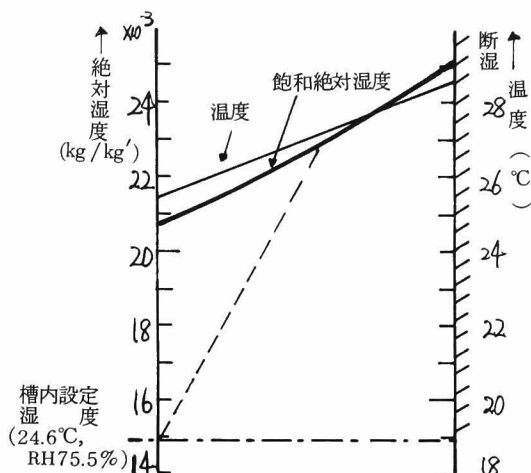


図 5-9 実験 E-11 設計条件

5-4-2 実験装置の特性

5-1 に述べた実験目的に適するように実験装置は作成されねばならない。ここでは作成された装置によって、目的に適する程十分な精度の測定が行なえるかどうかを確認する。

a) 実験装置の水蒸気洩出入量

材料内の含水量変化は槽内の飽和塩水溶液の重量変化によって得る方法をとっている。したがって、実験装置からの洩出入量

が存在すれば誤差となる。そこで、等温平衡状態になった時の飽和塩水溶液の減少量を洩れ量と考え、その時の槽内外の絶対湿度を測定し、洩れ量と絶対湿度差との関係を求めた。図 5-11 に種々の絶対湿度差に対する洩れ量の関係を示す。各実験において、吸湿量の変化はこの洩れ量の補正を行なって得た。

b) 槽内温湿度

槽内温湿度分布の一様性を目的として、槽内にはファンを設置している。一様性を確認するために槽内に熱電対 3 点おき温度分布を見た。結果、 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 以内であった。また槽内湿度は飽和塩水溶液により一定に保つようにしているが、吸湿による槽内湿度の低下が存在するかも知れない。この一定性はミニマ鋭感温湿度計により、結露過程の最初から平衡に至るまでほぼ一定値を取っていたことにより確認した。

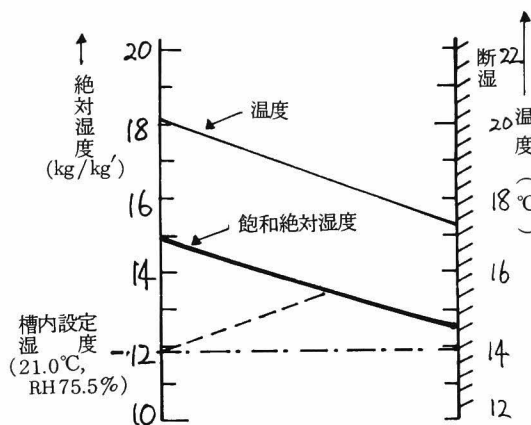


図 5-10 実験 E-12 設計条件

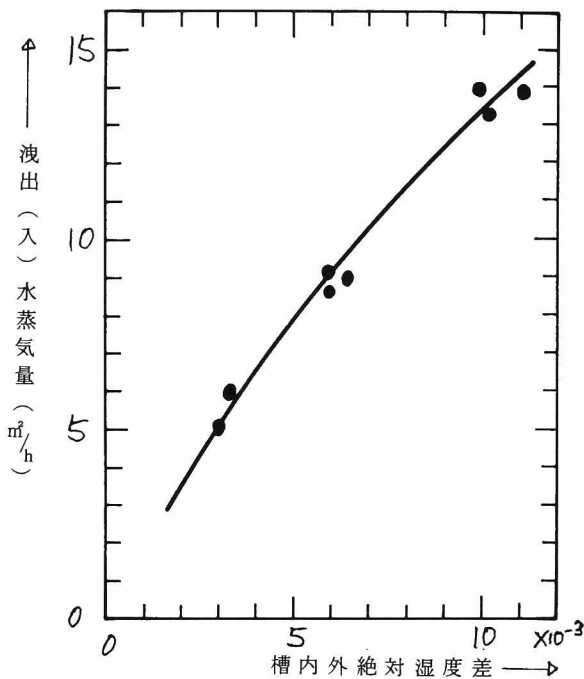


図5-11 装置の水蒸気洩出(入)量

c) 材料表面温分布

材料への吸湿,あるいは材料からの放湿が一次元になることが必要である。試料を試料板に設置する際の接合部における温度低下が大きければ二次元的になる。そこで試料と保護板の接合部にヒーターを設置している。このヒーターの電流を調整することにより表面温分布の一様性を保つようにした。図5-12にその結果の1例を示す。図から分るように、なお周辺における温度差が生じているが、次の d) で述べる含水率分布の一様性が保たれていることからこの差は許容し得る。

d) 材料内含水分分布の一様性

材料内への吸湿量は飽和塩水溶液の減少量で代用している。この吸湿は試料 10 cm 角全面より行なわれている。また、材料内の含水率分布の測定は5-3で述べたごとく試料の一部により行なわれる。したがって、材料内への吸湿が一様に行なわれていることを確認しておく必要がある。材料の各位置における含水率分布を図5-13～5-20に示した。図から分るようにほぼ一様と見なしてよいと思われる。今後の解析においては中央部分の含水率分布によって材料

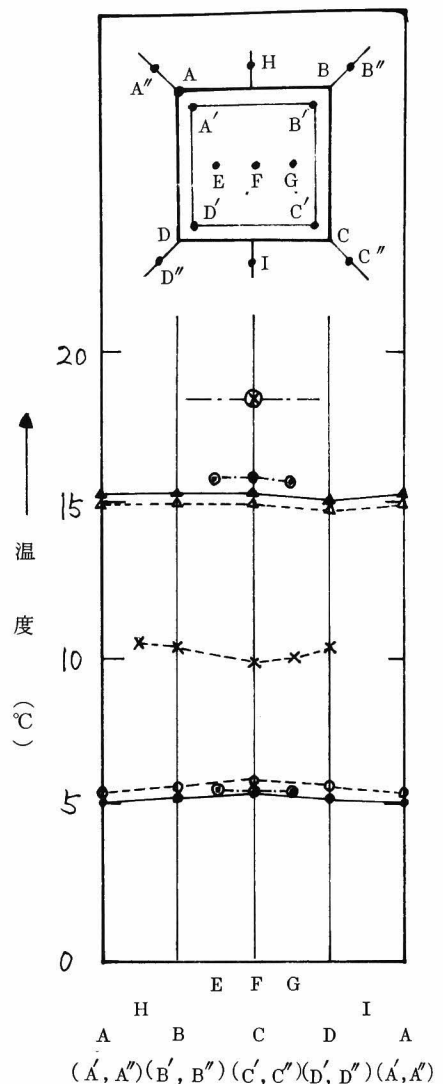


図5-12 材料表面温分布
(実験A-2)

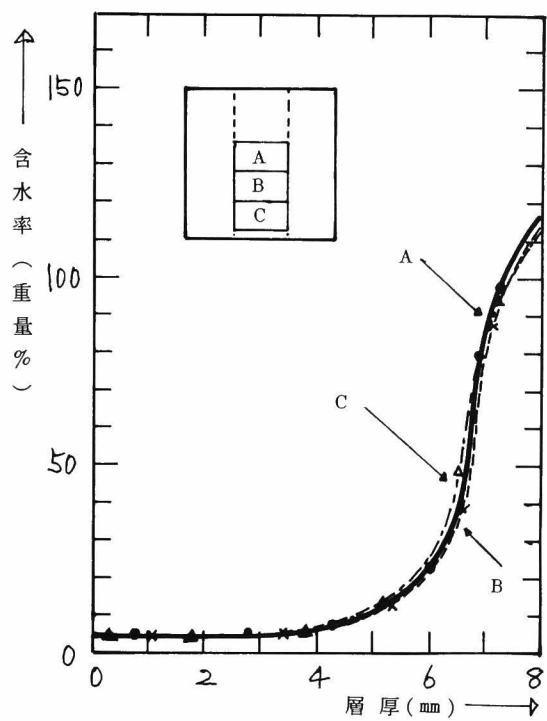


图 5-13 材料内含水率分布 (A-1)

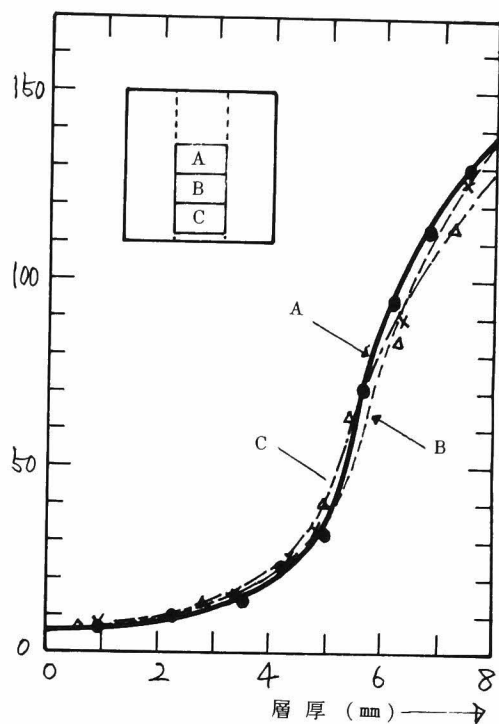


图 5-14 材料内含水率分布 (A-2)

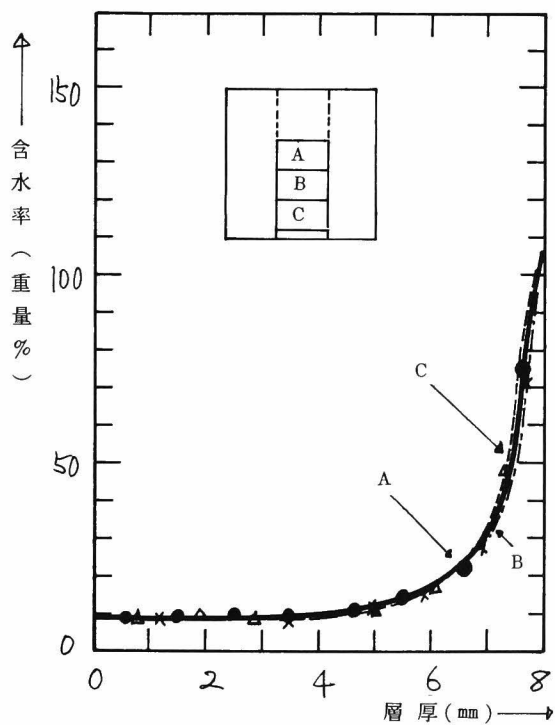


图 5-15 材料内含水率分布 (B-3)

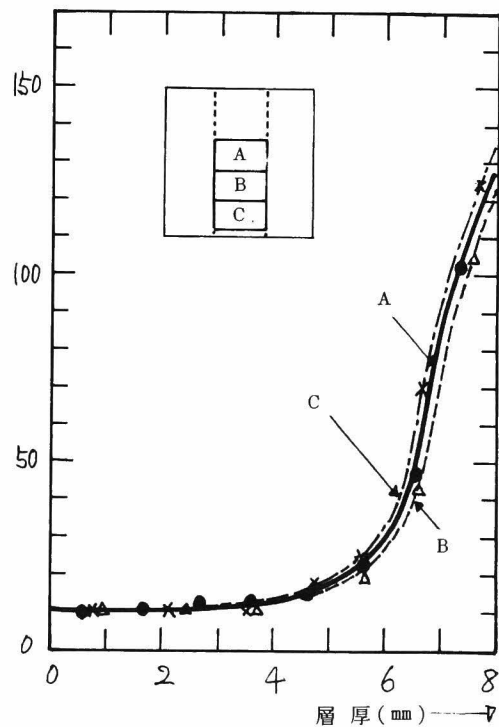


图 5-16 材料内含水率分布 (B-4)

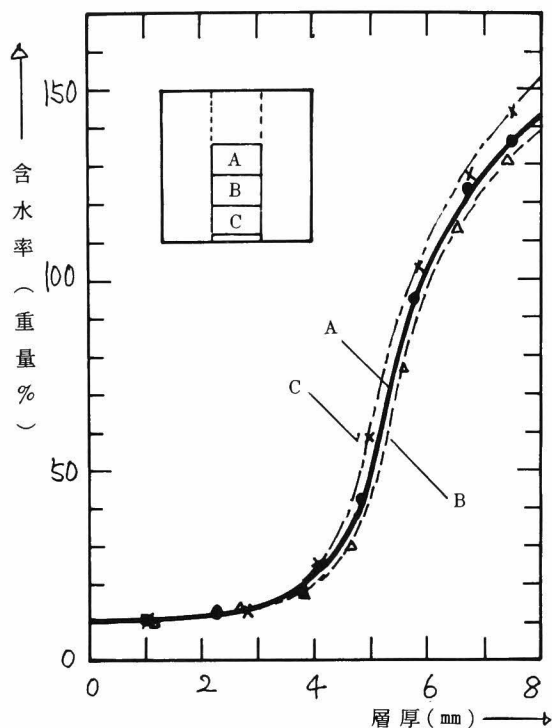


図 5-17 材料内含水率分布 (B-5)

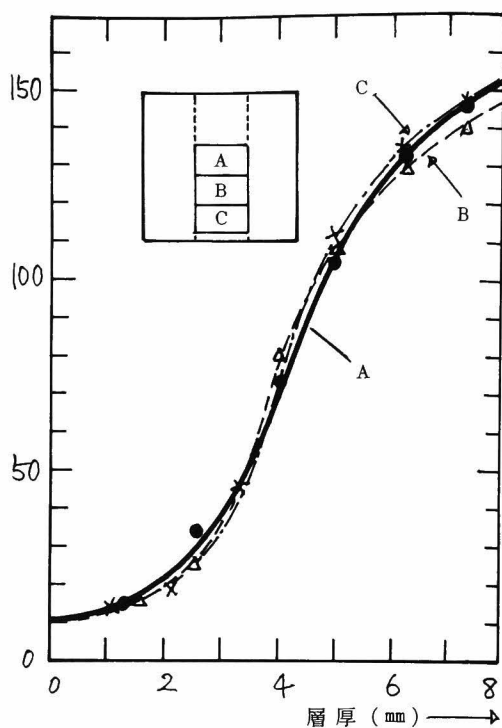


図 5-18 材料内含水率分布 (B-6)

の含水率分布を代表させる。

e) 飽和塩水溶液減少量と材料含水量

先に述べたように、吸湿量は飽和塩水溶液の減少量により、含水率分布は実験終了時の試料を分割することによって求めている。したがって、実験終了時に於いて両者が一致している必要がある。飽和塩水溶液の減少量から、a) の洩れ量を考慮して全吸湿量を出す。また、実験終了後、含水率分布を求めた試料と残りの試料の含水量も測定した試料全含水量を出す。これらの両者の比を回収率と名付け、5-4-1の表 5-1 に示している。

実験 A 以外はすべて 95 % 以上となっ

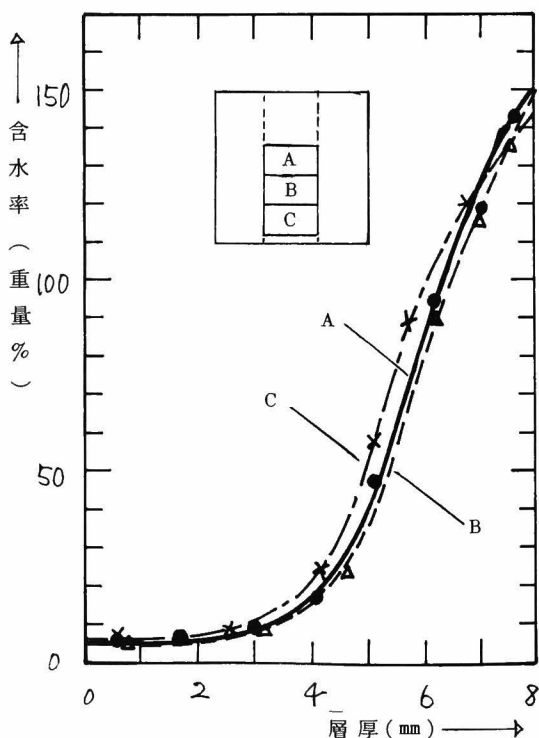


図 5-19 材料内含水率分布 (C-8)

ている。なお、この実験Aにおいては、断湿部分に附着した試料部分については含水量を測定しなかったために低い値になっているのであり、この部分を考慮したならば、実験Bと同程度の回収率になったものと思われる。以上のことから、試料内への吸湿量は飽和塩水溶液の減少量によって代用し得ると考えた。

5-4-3 内部結露^{62,64)}

内部結露の実験は異なった条件の三種類（実験A, B, C）で行なった。すなわち露点位置がほぼ中央である条件（実験A）、露点位置が高温側から1/4になる条件（実験B, C）であり、B, Cの違いは温度勾配を変えており、Cの方がBより大きい。これらの条件の違いは、露点位置の違い、温度勾配の違いおよび材料に与えられる温度の違いによって材料内の水分蓄積がどのようになるかを見るために考慮された。

含水率分布の時間経過を見るために、実験Aでは2回（A-1, A-2）、実験Bでは4回（B-3, B-4, B-5, B-6）、実験Cでは1回（C-8）行なった。

また、材料内の温度分布の変化を見るために、材料内に熱電対を挿入して実験Bの条件で1回（B-7）行なった。

以下に、内部結露における実験結果とその考察を述べる。

a) 温度変化

図5-21～5-23に、実験A, B, Cに対する温度変化の測定結果を示す。

実験A, Bの槽温、下表面温はほぼ一定に保たれている。また、上表面温は時間経過とともに

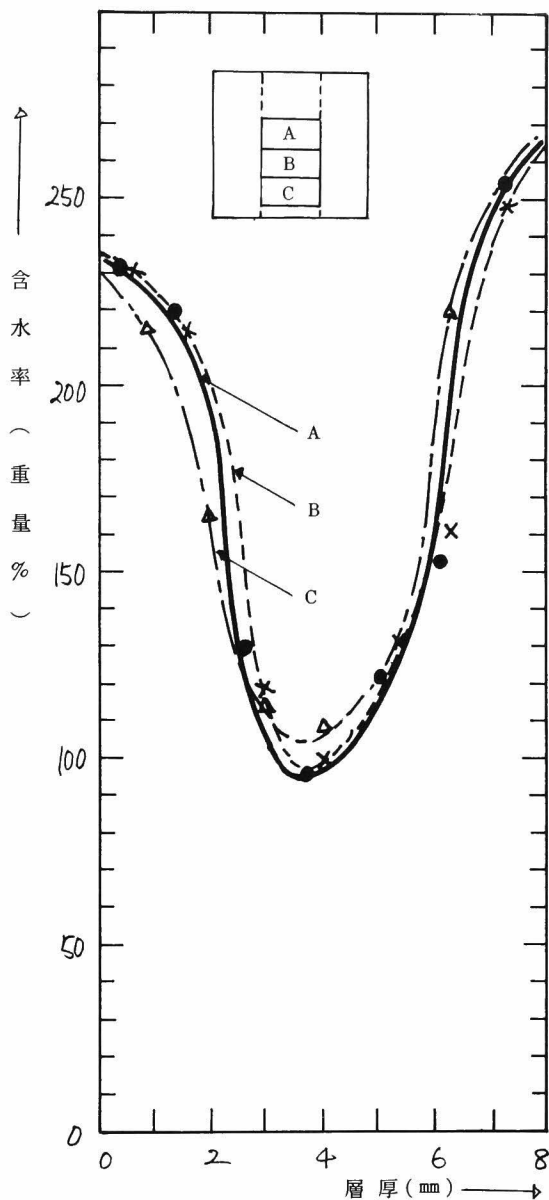


図5-20 材料内含水率分布（D-9）

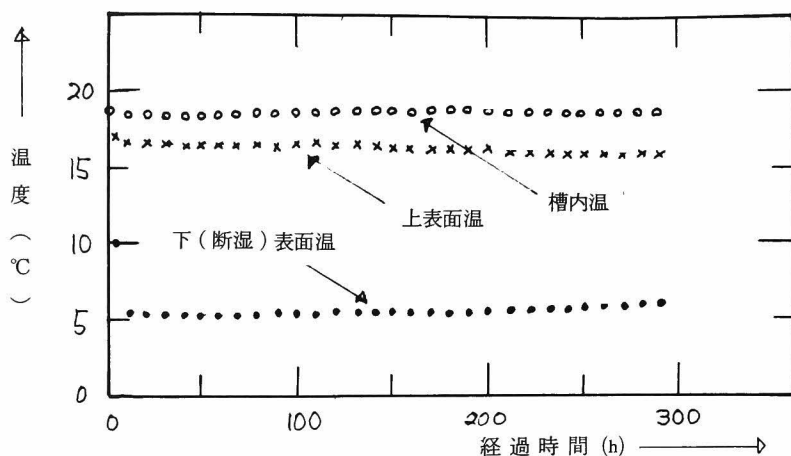


図 5-21 温度変化 (A - 2)

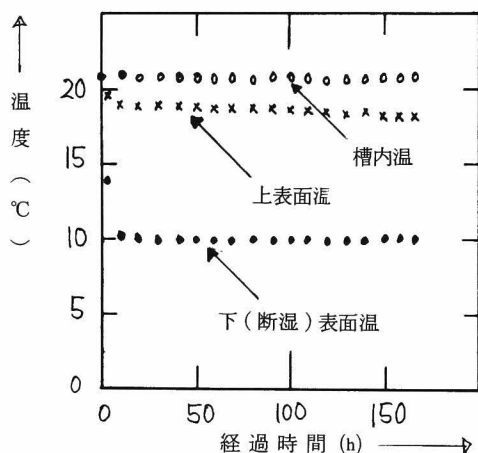


図 5-22 温度変化 (B - 6)

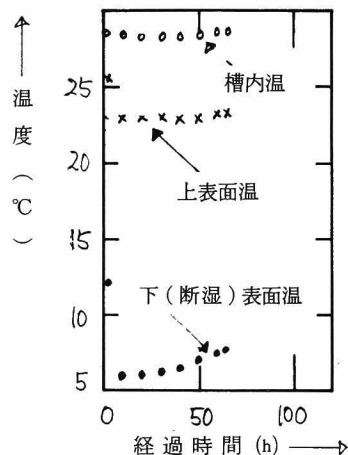


図 5-23 温度変化 (C - 8)

に下降していることが分る。このことは、結露の進行とともに材料内の含水率が増加し、その結果熱伝導率の増加が起きたためと思われる。実験Cにおいては、実験時間が短いためと下表面温の上昇のため上表面温の下降は見られない。下表面温の上昇は温度調節の不備のために生じたものである。後の第7章における基礎式の検討にこの結果も使用したが、境界条件としてこの下表面温を与えているため問題はない。

熱伝導率による材料内温度分布の時間変化については、内部の温度測定結果に基づき後節で詳しく述べる (5-4-6)。

b) 吸湿量

図 5-24 に、実験 A, B, C の吸湿量の時間変化を示す。実験 A の結果から分るように吸湿

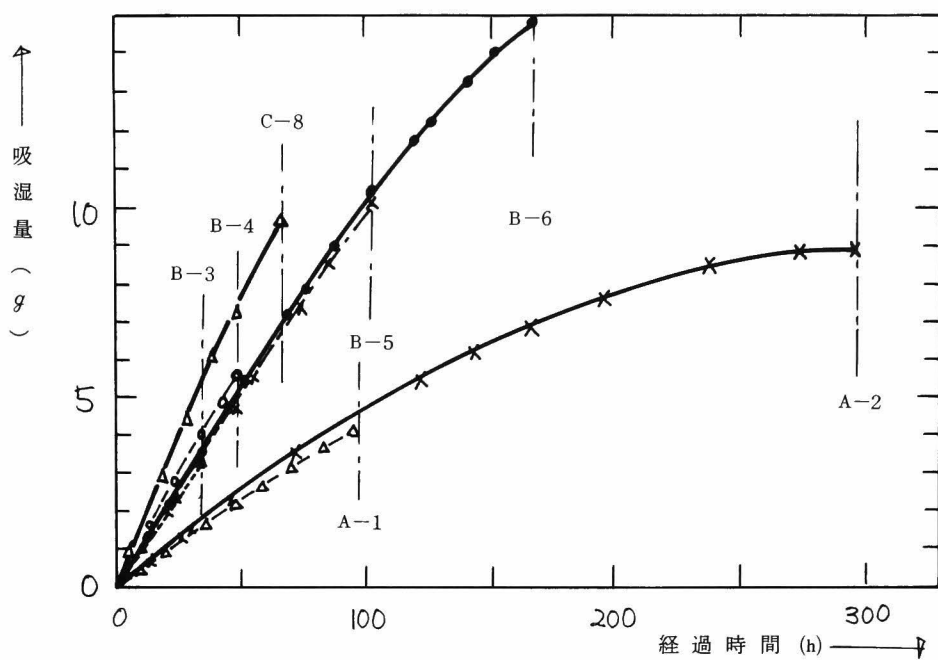


図5-24 吸 湿 量

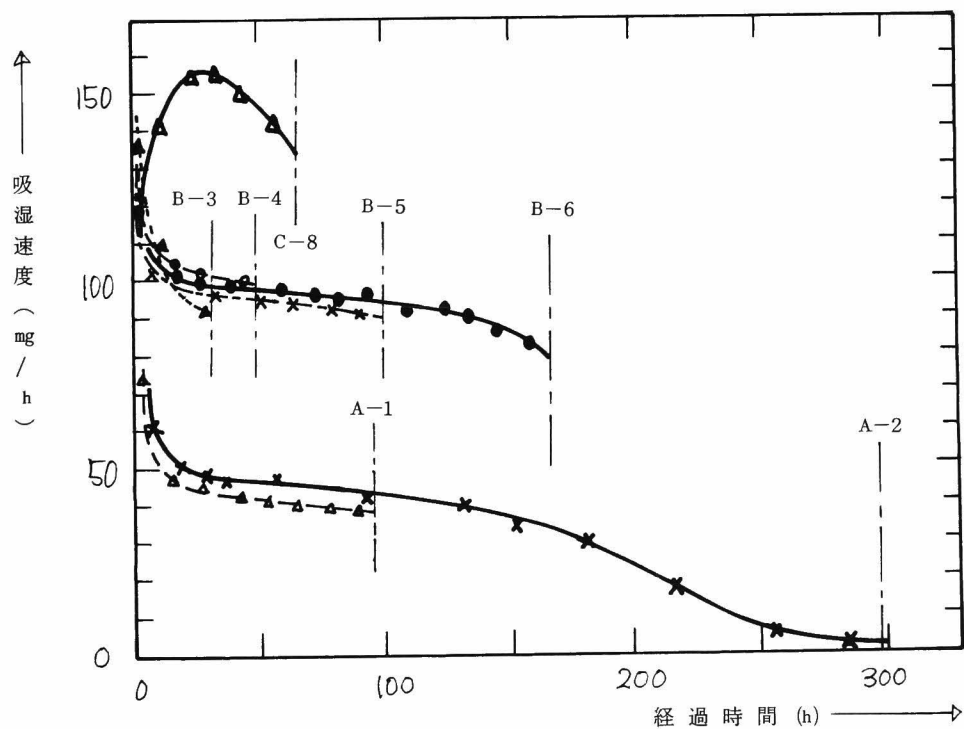


図5-25 吸 湿 速 度

量は内部結露の条件のもとで一定値に近づき平衡に達する。その値は 8.85 g である。この量を露点位置以下の全空隙体積に対する割合にすると 44.2 % となる。すなわち平衡時における吸湿水分は空隙をすべて満たしているのではないことが分る。この実験結果は実験条件の模式図 5-4 ~ 5-6 から推定されよう。すなわち、吸湿が止まる現象とは槽内湿度と材料の高温側部分の湿度とが等しいことによる。したがって、この平衡状態においては、材料内部の水蒸気圧分布が高温側から露点位置近くまで一定になっていると思われる。露点位置から断湿面までは水蒸気移動も液水移動も存在しており、かつこの水分移動は零となっている。よって、水蒸気移動と液水移動との動的平衡が成立しているはずである。結果として、空隙が液で満たされなくとも平衡していることになる。また、この動的平衡は内外温湿度条件によって影響を受けるから平均含水率も変化する。

以上の結果は興味のあることと思われる。すなわち、内部結露の条件において、片面を断湿しておけば最終的に結露は止む。また、その時の含水率は飽水含水率ではなく空隙の一部を満たすだけである。この結露量が材料に対して障害をもたらさなければ本質的に結露障害防止が為されたことになるからである。

c) 吸湿速度

図 5-25 に、実験 A, B, C の吸湿速度の時間変化を示す。この吸湿速度の変化で特に注目されるのは、かなりの期間ほぼ一定速度の吸湿が続いていることである。この点については、材料内含水率増加による熱伝導率の影響が大きく効いていると思われる。図 5-26 に、実験 B に対応する条件下での材料内温度測定の結果 (B-7) より飽和絶対湿度分布を算出した結果を示した。図から分るように、材料内飽和絶対湿度分布は時間とともに下降している。したがって、吸湿が進むにつれて材料内において飽和絶対湿度に近い値を取る範囲は増大してゆくけれども、その境界の絶対湿度はそれほど増大しない。ここで、簡単のために、吸湿速度は槽内湿度とこの境界における絶対湿度を結んだ直線の絶対湿度勾配に比例していると考え、図中の各時間に対し、材料内において飽和絶対湿度とほぼ等しい値をとる範囲の境界が 1 → 2 → 3 であるならば、一定速

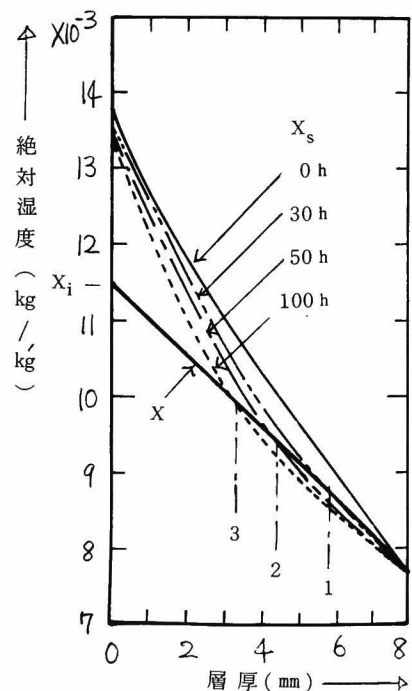


図 5-26 材料内飽和絶対湿度 (B-7)

度の値は約 100 時間続くことが知れよう。

次に、この一定吸湿速度と、槽内絶対湿度と断湿側表面温に応じる飽和絶対湿度との絶対湿度差の関係を求めた。その結果が図 5-27 に示されている。また、図上には次式によって得られる関係を直線によって示した。

$$q_v = k_v S \frac{X_i - X_{so}}{L} \quad (5-1)$$

ここで、 $k_v = 2.26 \times 10^{-2} \text{ kg/mh (kg/kg')}$ を用いている。この計算結果は測定結果と良く一致している。すなわち、一定吸湿速度の値は、断湿面での絶対湿度が断湿面での温度に応じる飽和絶対湿度になった時に、材料内の水分移動は水蒸気のみで、さらに材料内の絶対湿度分布は直線であると考えて計算した水蒸気流で近似できることを示している。

以上のことは、設定条件より結露状態の初期における吸湿速度、吸湿量の予測を可能にする。

d) 含水率分布

図 5-28 ～ 5-30 に実験 A, B, C に対する材料内含水率分布の時間経過を示す。図から分るように、結露は断湿面側から生じている。この現象は内部結露において常に成立するとは言えない。後の 5-4-4 の表面結露実験でも分るように、露点位置が極端に高温側近くになる場合には、断湿面と表面近くに結露量の蓄積が見られると予想されるからである。ここでの実験は、図 5-4 ～ 5-6 の模式図で示される条件下であるため、材料内の飽和絶対湿度分布と材料両表面の絶対湿度を結ぶ直線は材料内部で接点をもたな

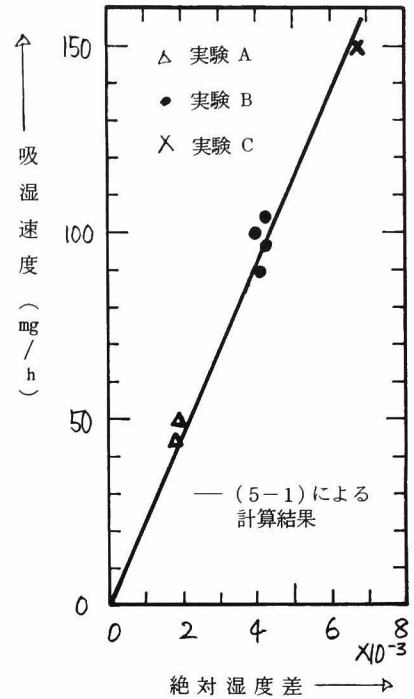


図 5-27 吸湿速度と絶対湿度差との関係

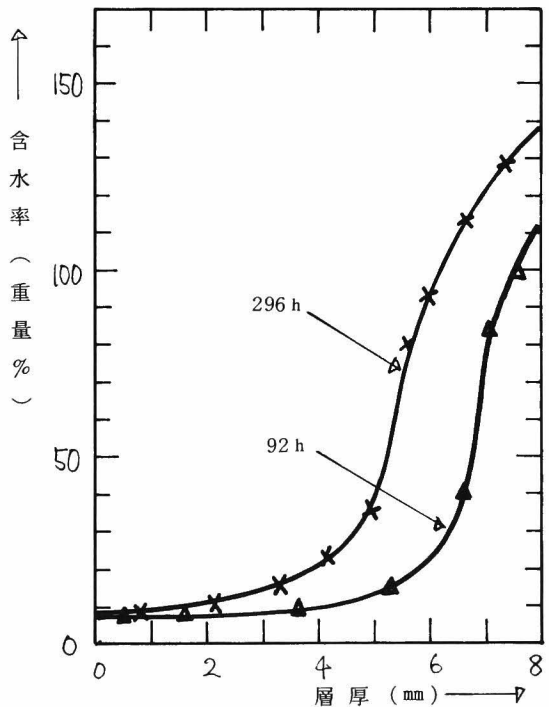


図 5-28 実験 A の含水率分布の時間経過

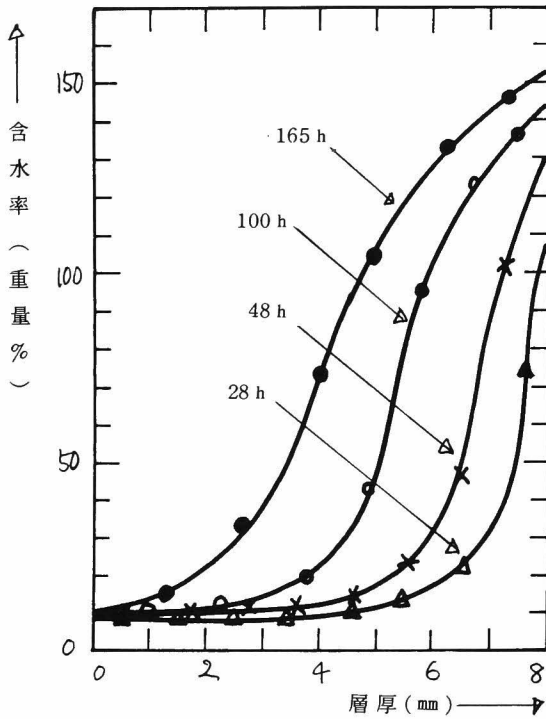


図 5-29 実験 B の含水率分布の時間経過

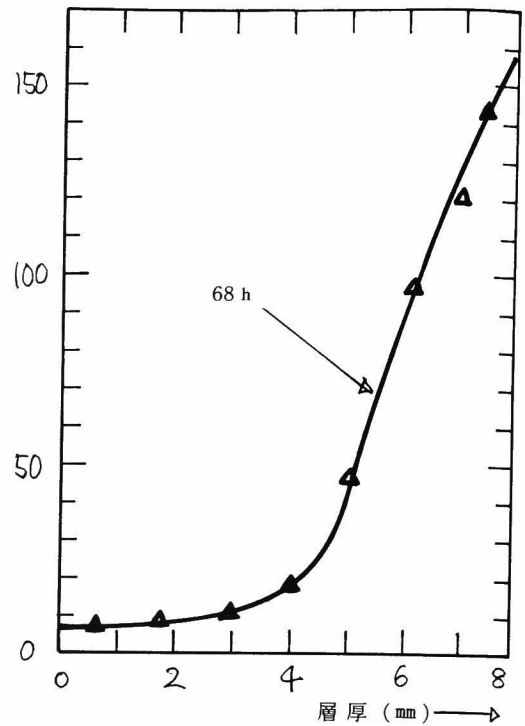


図 5-30 実験 C の含水率分布の時間経過

い。したがって、材料内部においての凝縮が起る条件でなく、その結果、結露が断湿面側から生じたと思われる。

含水率分布形は、すべての実験条件下ではほぼ同様な結果を示し、S字型である。含水率は吸湿速度の大きさに比例して増大している。また、初期においては含水率の低いところと高いところと明確に分離されるが、時間の経過とともにこの傾向はゆるめられる。

5-4-4 表面結露

結露を許す結露障害防止の基本的な考えは、材料に結露水を蓄積することによって、結露に対する制約を緩和することである。そのために、材料内の水分蓄積の挙動を知る目的でまず内部結露実験を行なった。

しかし、内外温湿度変動にともない結露に対する条件は内部結露ばかりでなく表面結露の条件にもなり得る。結露を許す場合の条件は内部結露の条件に限定されることはない。表面結露の条件下でも、結露水是表面にのみ蓄積されるのではなく、材料内部へも水分移動の結果蓄積される。したがって、この時の材料内水分蓄積の状況を知り、材料に障害が起らない程度であれば表面結露も許されることになる。

また、前節の内部結露の結果、材料内の含水率の増加は断湿面側から生じていた。しかし条件によっては、材料内部から増加してゆくことも予想される。この状況は、その特別な場合として表面結露の条件が考えられ、この実験から推定することができる。

以上の理由から、ここでは表面結露の条件の実験を行なった。実験条件の模式図はすでに示した図5-7である。

a) 温度分布

図5-31に実験D-9の温度の時間経過を示した。同時に露点温度をも示している。露点温度は上表面温より僅かに高い値である。これは実験装置の作成上、あまり高い湿度にすると、試料面ばかりでなく試料板全面に結露してしまうからである。今回の実験で、試料面のみに結露していることは表5-1に示した回収率が94.8%であることから確認できる。

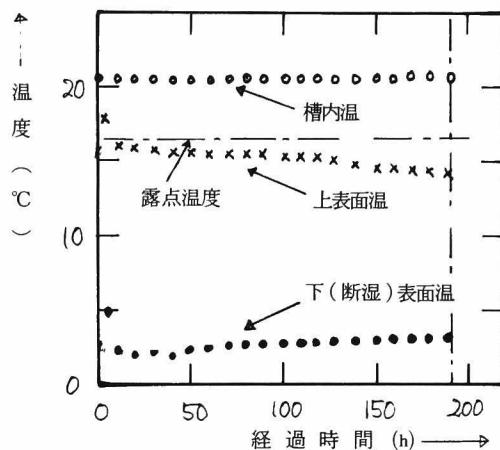


図5-31 温度変化(D-9)

b) 吸湿量および吸湿速度

図5-32に吸湿量および吸湿速度の時間変化を示す。吸湿速度は最初内部結露と同様な経過を示すが、後に再度吸湿速度の増加が見られる。その結果、吸湿量も平衡状態には達せず時間とともに増加してゆく。最初は表面結露の条件であっても、材料が乾燥しているためまず材料内部での蓄積が生じ、後に表面および内部の蓄積が生じると思われる。

c) 含水率分布

この実験の含水率分布はすでに5-4-2 d)で図5-20に示している。図から、この含水率分布の特徴は、断湿面側と表面側に含水率の増加が認められることである。

この結果は重要である。すなわち、材料が吸放湿性でない場合、例えば、ガラス、金属、あるいは材料表面に断湿材が設けてある場合に、表面結露が生じるとすべての結露は表面で起る。その結果、表面での水分の蓄積能力がないため、水分の落下が生じる。これに比し、吸放湿性材料の場合には、表面での水分蓄積と材料内部での水分蓄積が生じ、局所的な含水率の増大を緩和することになる。

5-4-5 結露—蒸発過程⁶⁸⁾

結露を許す結露障害防止を目的とする時、結露過程ばかりでなく蒸発過程も重要な要素であ

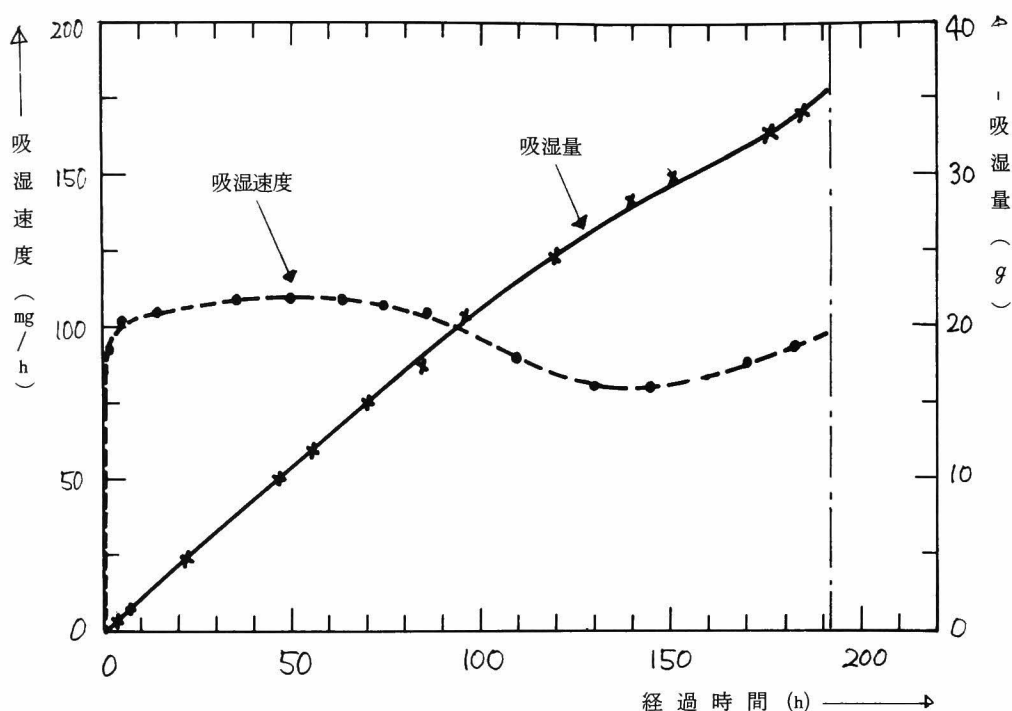


図 5-32 実験 D の吸湿量, 吸湿速度

る。すなわち、内外温湿度変動とくに外気温変動にともない材料内において結露－蒸発過程が生じる。したがって、この時の材料内の含水率を知り、この含水率が障害を生じさせるかどうかを判定することによって問題を処理しなければならない。

我々が問題とする蒸発過程は、化学工学の分野で行なわれている乾燥過程と比較することにより明らかになると思われる。乾燥過程は、一様な初期含水率分布の状態からいかに材料が乾燥してゆくかであり、蒸発過程は、いったん結露した材料内水分がいかに蒸発してゆくかである。図 5-33 に、軟質繊維板について最初一様な含水率分布から乾燥させた時の実験結果と計算結果を示したが、このような経過と、すでに 5-4-3 で述べたような結露過程から、任意の時刻に蒸発過程へ移行させた後の材料内含水率変化の経過とは大きく変わるだろう。また、乾燥過程は与えられる温度が一定の場合であるのに比し、結露－蒸発過程においては変動する。したがって、結露過程における含水率分布は、内外温湿度変動および結露期間によって影響を受け、同様に蒸発過程もその影響を受けることになる。

ここでは、結露過程の条件を実験 B の条件に固定し、結露期間および蒸発条件を変化させた時の材料内水分蓄積量の変化を調べた。実験 E-10 の蒸発条件は、断湿側表面温と槽内空気温をほぼ等しくしている。ただし、結露過程は最終平衡まで行なっている。E-11 は断湿側表面温を槽内空気温より高くしたもので、E-12 は断湿側表面を露点温度より少し高くしたも

のである。

図5-34～5-36に、E-10～E-12の吸湿（放湿）量および吸湿（放湿）速度の時間変化を示す。

ここで、E-12の放湿量は最終的に零となっていない。しかし、放湿速度を見ると零となっている。したがって、完全に平衡していることは明らかである。よって、材料内の絶対湿度分布は槽内湿度と等しく一定となっているはずである。一方、材料内温度分布は条件設定の状態であるから、断湿面側が低く露点温度近くの値をとっている。以上のことから材料内相对湿度分布を考えてみると、槽内側表面で槽内相对湿度とほぼ等しい値をとっており、断湿側に向かって高くなり、断湿面でRH 100%近くの値をとっている。この相对湿度分布にしたがって材料内含水率も分布しているため、最初与えられた結露前の含水量より高い状態で平衡したのである。このことを確認するために、平衡に達した後、槽内湿度と材料温を等しくした結果、放湿量が零となった。

次に、結露過程と蒸発過程の差異を見るために、図5-37には、結露過程の吸湿量および蒸発過程の放湿量の時間変化を示した。図から分るように、蒸発条件の一番悪いE-12でも結露過程と同程度の変化をしており、他のE-10、E-11の場合は結露過程に比し圧倒的に速く蒸発している。

これらの結果は結露および蒸発の条件によって大きく変わるが、条件の比較は、槽内絶対湿度と断湿表面温に応じる飽和絶対湿度差を比較することによって一応できると思われる。そこで、この絶対湿度差と吸湿、放湿の初期の速度の比較を行なってみた。結露過程の結果はすでに5-4-3の図5-27で示している。図5-38には、この結果と蒸発過程の結果を示した(×印)。図から分るように、蒸発過程では結露過程の値よりも常に高く、2倍から4倍の値をとっている。

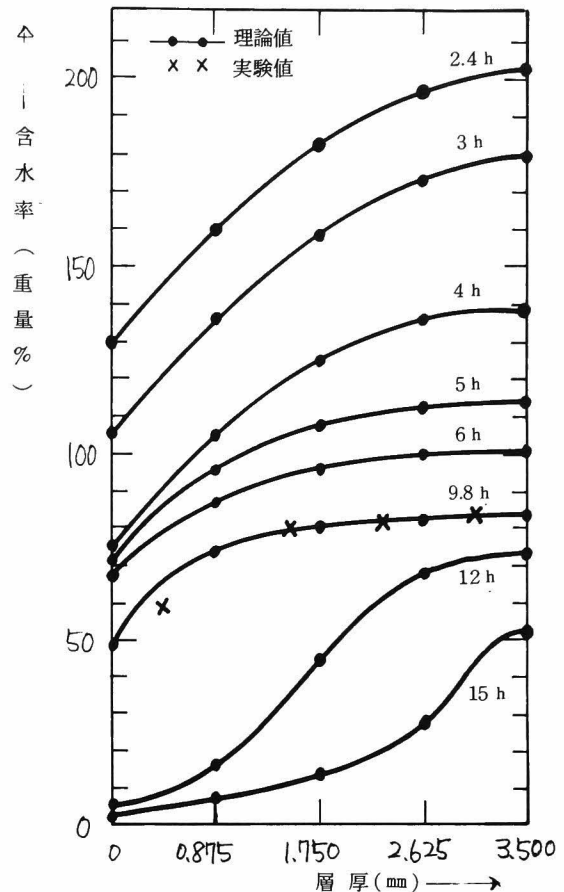


図5-33 乾燥過程の含水率分布変化

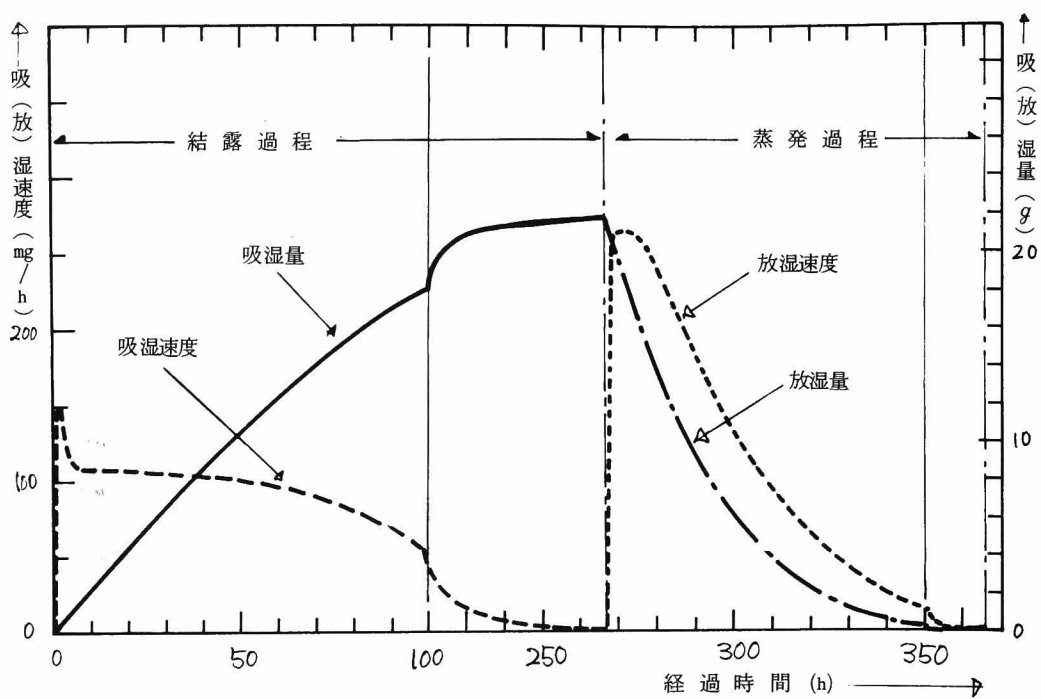


図5-34 E-10の吸(放)湿量, 吸(放)湿速度

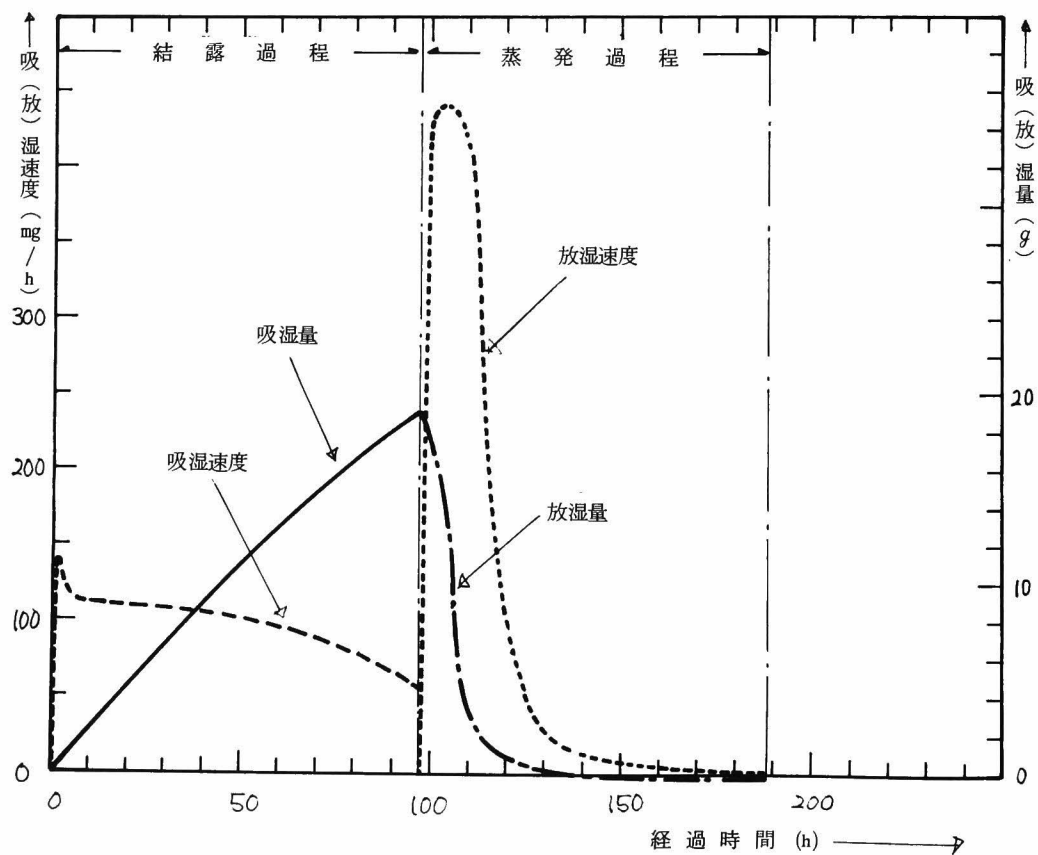


図5-35 E-11の吸(放)湿量, 吸(放)湿速度

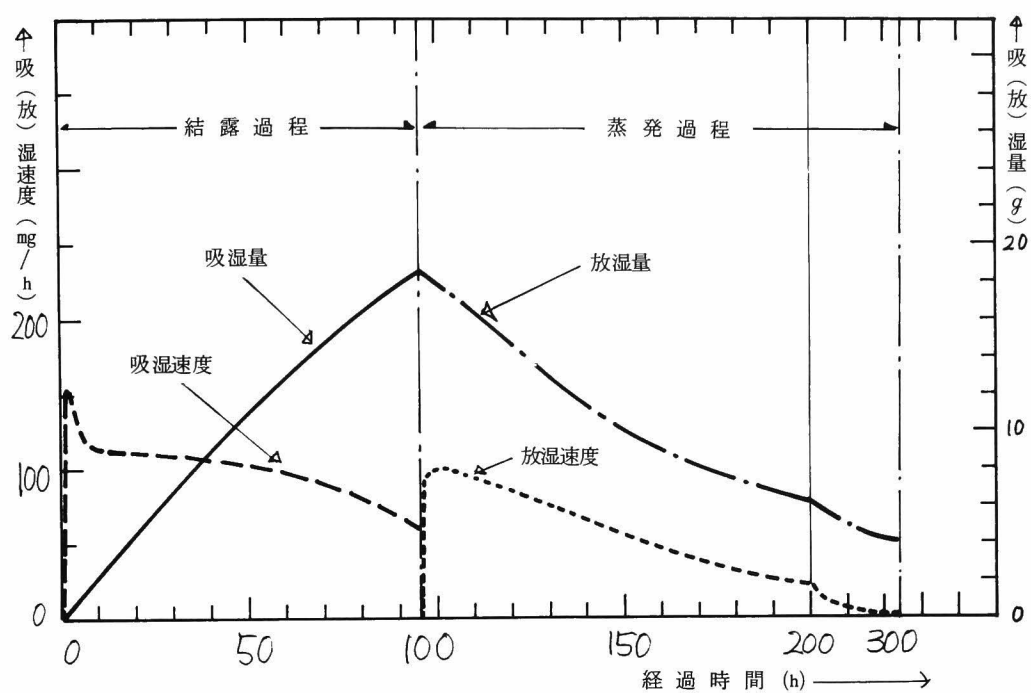


図 5-36 E-12 の吸 (放) 湿量, 吸 (放) 湿速度

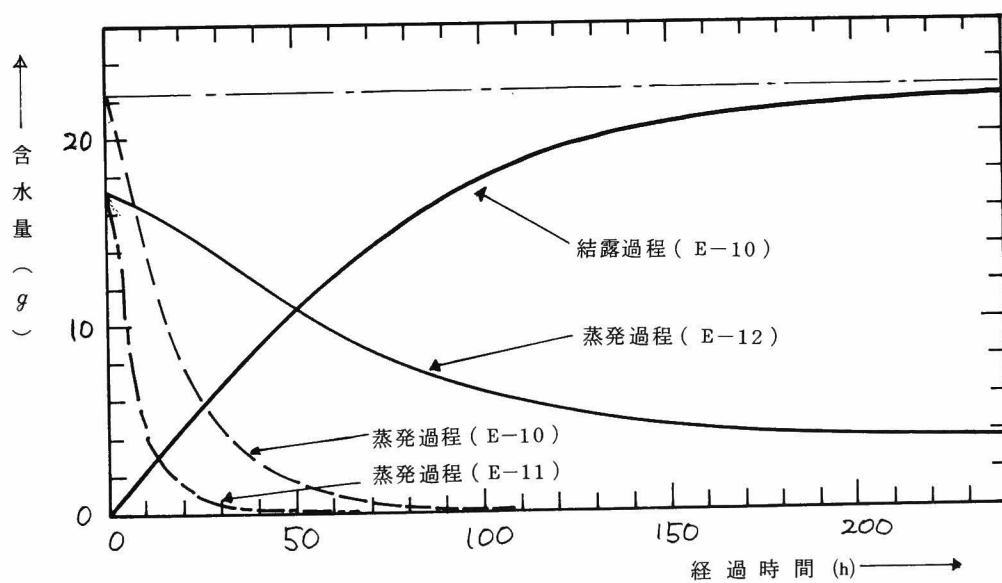


図 5-37 結露過程と蒸発過程における含水量

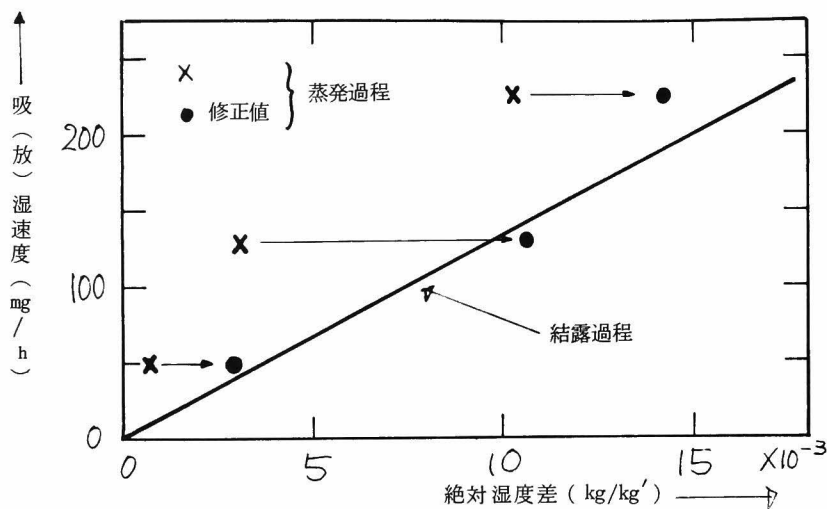


図 5-38 吸(放)湿速度と絶対湿度差との関係

この原因は結露過程によってすでに材料内に水分が蓄積されているため、蒸発が始まる時に、主に蒸発する面が材料の内部にあるからと思われる。後の第 7 章において、熱水分同時移動方程式による結露過程の解析を行なっているが、この時の材料内相対湿度分布は、実験 B の条件の場合、含水率が 45 (重量%) 以上の範囲ではほとんど RH 100 % に近い値をとっている。よって、蒸発過程において、含水率が 45 (重量%) の位置から主に蒸発が生じていると考え、この位置の温度に応じる飽和絶対湿度と槽内絶対湿度との差を算出し、これを材料厚に換算しなおし、図 5-38 に修正結果を示す (●印)。この結果は、結露過程の結果と良く一致している。なお、各実験の蒸発面は結露実験 B の対応する経過時間後の含水率分布より決定し、E-10 の場合は露点位置をとった。これらの位置と放湿速度の目安を示すため絶対湿度の分布を模式図 5-8 ~ 5-10 に示している。

以上の考察から、結露過程に比し蒸発過程は常に速く生じることが明らかとなった。

5-4-6 材料内温度分布

材料内の熱伝導率は含水率とともに大きく変化する。この変化は 5-4-3 で述べたように吸湿過程の結果にも大きく影響する。材料内部での含水率増加とともに実際の程度の温度変化が生じているかを知ることは興味のあることと思われる。ここでは、あらかじめ材料内部に熱電対を挿入することによってこの変化を調べた。実験 B-7 はそのための実験である。材料内挿入熱電対位置は以下のごとく決定した。結露実験の初期の段階においては吸湿量は僅かであるため熱伝導率一定と見なせる。また使用した材料は熱的に薄壁と見なせるからこの時期に

おける温度分布は直線と考えて良い。このことから上下両表面温と内部の温度測定値より熱電対位置を決定した。この結果、 $x = 2.9\text{ mm}$ と $x = 4.9\text{ mm}$ の位置に熱電対が入っていることが明らかとなった。熱電対を挿入したことによる水分蓄積への影響を調べておく必要がある。そのため、この実験 B-7 は実験 B と同一条件で行ない、その結果の吸湿量、吸湿速度の時間経過が挿入しない実験結果の時間経過と一致していることを確認し、この影響が無いと判定した。

図 5-39 に材料内温度の時間経過を、図 5-40 に主要な時刻の材料内温度分布を示す。この実験の場合、槽内温の制御が少しまずく変動が激しいが、図 5-39 から知れるように、この変動にもかかわらず材料内の温度低下は顕著に見られる。また、この低下は断湿面側から始まり順次高温側に移っている。この変化は図 5-40 で知れるように、 $x = 2.9\text{ mm}$ の位置で最初の定常温度分布による断湿面との温度差が 5.7°C であるのに対して、165 時間後では 1.8°C の低下が見られ、その割合は約 32 % である。同様に、 $x = 4.9\text{ mm}$ の位置においては温度差が 3.4°C に対して、 1.2°C の低下であり、その割合は約 35 % である。これらの温度低下は非常に大きいと言える。この結果は材料内水分移動に大きく効くこととなり、このことが 5-4-3 の吸湿速度一定の現象の原因にもなっている。

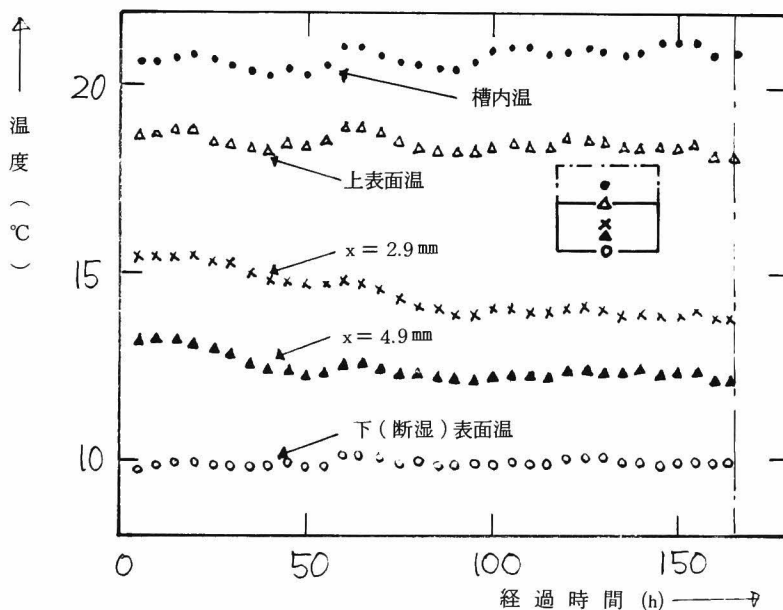


図 5-39 材料内温度変化 (B-7)

5-5 第5章のまとめ

本章において、材料内の水分蓄積の状況を見るために、軟質繊維板を使用して種々の条件下で実験を行なった。以下にその結果をまとめる。

1) 内部結露

i) 片面断湿の条件では結露は最終的に平衡に達する。ただし、露点位置が高温側表面に近い場合は吸湿量の増加による熱伝導率の増大の結果表面結露の可能性が生じる。

ii) 結露が止む最終平衡時の含水率は、空隙をすべて液で満たした時の飽水含水率よりかなり小さい。

iii) 吸湿速度は結露後単調に減少してゆくのではなく、熱伝導率の増加によりほぼ一定の吸湿速度がかなりの時間続く。この一定速度の期間中の吸湿量は平衡状態における全吸湿量の約 $1/2 \sim 2/3$ を占めている。一定吸湿速度は槽内絶対湿度と断湿表面温に応じる飽和絶対湿度との差に比例し、この関係が求められた。一定吸湿速度後の吸湿速度は単調に減少する。

iv) 含水率分布は明確なS字形である。最初含水率の立ち上がりが急で時間が増加してゆくとともに勾配はゆるやかになる。

2) 表面結露

吸湿速度の変化は、最初内部結露と同様な経過をたどるが、ある一定時間後吸湿速度の減少が止み増加に転じ、後ほぼ一定速度になる。材料内含水率分布は断湿側と表面側に顕著な増加が見られ、中央部分は小さい。表面結露でも表面のみに水分蓄積が起るのではないことは、材料の水分蓄積能力を有効にいかす結露対策への示唆を与える。

3) 結露-蒸発過程

結露後の蒸発過程は結露過程に比し一般的に非常に速いことがわかった。この原因は、吸湿

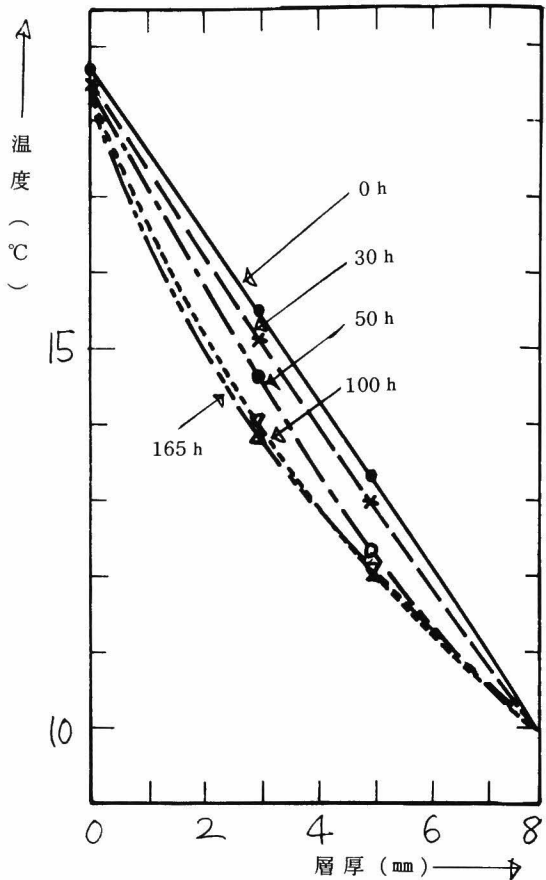


図5-40 材料内温度分布の時間変化

速度を一番高くさせる結露面が断湿面であるのに対し、蒸発速度を一番高くさせる蒸発面が材料の内部にあることによる。

4) 材料内温度分布

- i) 結露過程において、材料内の温度分布は時間とともに低下する。低下は断湿面側から起り、順次高温側に移ってゆく。
- ii) 低下の程度は非常に大きく、結露過程における水分蓄積に大きな影響を及ぼす。

第 6 章 熱水分同時移動方程式に現われる移動係数^{40,65,69,71~73)}

6-1 はじめに

結露問題を結露障害防止の観点に立って処理する場合、内外温湿度変動にともなって生じる非定常過程の材料内含水率分布を予測する必要がある。このためには、第 3 章で述べた熱水分同時移動方程式の適用の可否を検討しなければならない。この適用の可否は、基礎式を導出したところのモデルの妥当性ばかりでなく、基礎式に現われる移動係数の決定および精度に依存するものであり、移動係数の決定法なしに基礎式は確立されたとは言えない。

第 3 章で述べた本研究で検討する基礎式に現われる移動係数は、含水率勾配による水分伝導率 D_θ 、温度勾配による水分伝導率 D_T 、および熱伝導率 λ である。また、熱水分同時移動において必然的に生じる相変化の影響を表現するために、水分伝導率 D_θ 、 D_T の液水成分 ($D_{\theta\ell}$ 、 $D_{T\ell}$)、水蒸気成分 ($D_{\theta v}$ 、 D_{Tv}) の分離も必要である。

本章においては、これらの移動係数の決定に関して、従来の種々の方法のうち、特に建築壁体に適した方法について検討し、また、問題点の多い液・水蒸気成分の分離について詳細に検討を行ない、我々がここで用いた軟質繊維板についての移動係数を求めた。

6-2 解析に用いる熱水分同時移動方程式

解析に用いた基礎式は、第 3 章 3-5 で述べたごとく、変形がなく、Bulk flow の生じない場合で、材料内の水蒸気移動と液水移動とが二相流モデルのもとで生じるとしたものである。さらに、材料内での局所平衡が成立しているとする。このとき、水分移動と熱移動の基礎微分方程式は、(3-127)~(3-130) で表現される。すなわち、

水分移動に対して

$$\left(1 + a r_g \frac{\partial g}{\partial \theta}\right) \frac{\partial \theta}{\partial t} + \left(a r_g \frac{\partial g}{\partial T}\right) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (D_\theta \nabla \theta) + \nabla \cdot (D_T \nabla T) \quad (6-1)$$

$$D_\theta = D_{\theta v} + D_{\theta \ell} = k_v \frac{\partial g}{\partial \theta} + D_{\theta \ell} \quad (6-2)$$

$$D_T = D_{Tv} + D_{T\ell} = k_v \frac{\partial g}{\partial T} + D_{T\ell} \quad (6-3)$$

熱移動に対して

$$\begin{aligned} & \left(c r + L a r_g \frac{\partial g}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial t} + \left(L a r_g \frac{\partial g}{\partial \theta} \right) \frac{\partial \theta}{\partial t} \\ & = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + L \nabla \cdot (D_{\theta v} \nabla \theta + D_{T v} \nabla T) \end{aligned} \quad (6-4)$$

また、局所平衡の仮定のもものでは、水分流 q_w は

$$\begin{aligned} q_w = q_v + q_\ell & = - (D_{\theta v} + D_{\theta \ell}) \nabla \theta - (D_{T v} + D_{T \ell}) \nabla T \\ & = - D_\theta \nabla \theta - D_T \nabla T \end{aligned} \quad (6-5)$$

で表現される。

6-3 含水率勾配による水分伝導率 D_θ ⁶⁵⁾

等温における材料内水分移動の係数 D_θ の決定に対して、従来から種々の方法が提案されている。測定法は、大別して定常法と非定常法の二種類があり、それぞれ長所、短所をもっている。ここでは、定常法によって D_θ を求めた。

6-3-1 測定方法

(6-5) より、等温で一次元流れの場合、水分流は

$$q_w = - D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (6-6)$$

となる。したがって、材料の一端に水分を供給し、他端から蒸発させ、定常の流れになった時の水分流 q_w と、この時の含水率分布から含水率勾配 $\partial \theta / \partial x$ を求め、(6-6) より D_θ が決定される。

6-3-2 実験の装置およびその方法

実験装置を図 6-1、図 6-2 に示す。図 6-1 は、実験装置の本体であり、ガラス容器 ① (内径 30 mm, 長さ 150 mm) に基盤④ (G4 の Glass Filter) を、さらにその上に試料⑤を取付けたものである。ここで、Glass Filter は、一定の負圧 (suction) 下での⑤から①への空気流入を防ぐために用いられており、2 m 水柱までの負圧がかけられる。③は①への水分補給のためのものであり、実験中コックは閉じられている。

図 6-1 の本体は、図 6-2 のアルミ製容器⑥内に入れられ支持台⑬の上に置かれる。このアルミ製容器は、二重槽で、前面は透明の塩化ビニール板であり、実験中両者はスーパーシラ

ントにより接着されている。試料内の含水率を調節するために、図6-1の①内の水圧を変えている。この水圧を負圧（ H_{cm} ）に保つために用いられるビニールパイプ②は、塩ビ板の穴を通して下方の水平に置かれた目盛付きガラス管⑦（内径3mm）に接続され、⑦内の水面の移動より蒸発量が求められる。なお、⑦の先端⑧は、内径0.1mm位となっており、大気に接する一方で水面からの蒸発をできるだけ小さくしている。⑥の内部は、飽和塩水溶液⑨とファン⑩により一様一定湿度に保たれ、一定温度は図6-2装置全体を恒温室（ $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ）に入れることにより得られた（ $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ）。容器内の温度は、Cu-Co 熱電対（0.3mm ϕ ）により、湿度一定の確認はミニマ鋭感湿度計⑫によった。

試料⑤は、約25×35（mm）の軟質繊維板（約8.5mm厚）を用いた。側面はスーパーシーラント（約1mm厚）、さらにその上にパラフィン（約2mm厚）を塗り断湿した。この試料を4～5層重ねたもの、および1層のみの場合の両者を用いた。

実験方法は以下のごとくである。装置を設置し、所定の suctionのもとでの水分移動を開始させる。⑦内の水面の進行速度の時間的な変化の測定を行ないこの進行速度が一定になった時に実験を終える。この時に、図6-2の前面の塩ビの板を取りはずし、試料を根元近くで切断する。そして、試料全体の重量を測定する。これは、後述の回収率計算において用いられるもので、試料分割操作時の水分蒸発等の誤差を見積るために測定している。続いて、この試料を平均1.2mm厚に分割し、秤量ビンに入れ重量を測定する。その後、試料を乾燥させ

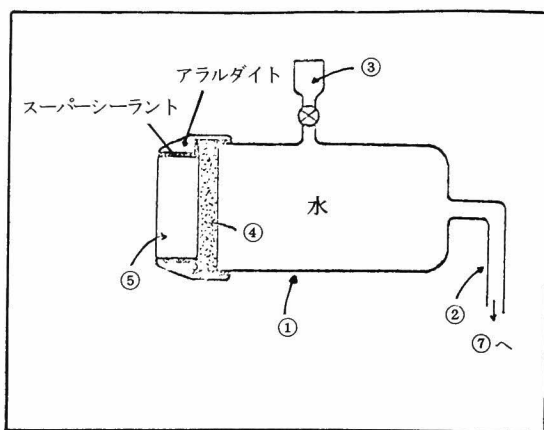


図6-1 含水率勾配による水分伝導率 D_{θ} の実験装置（本体）

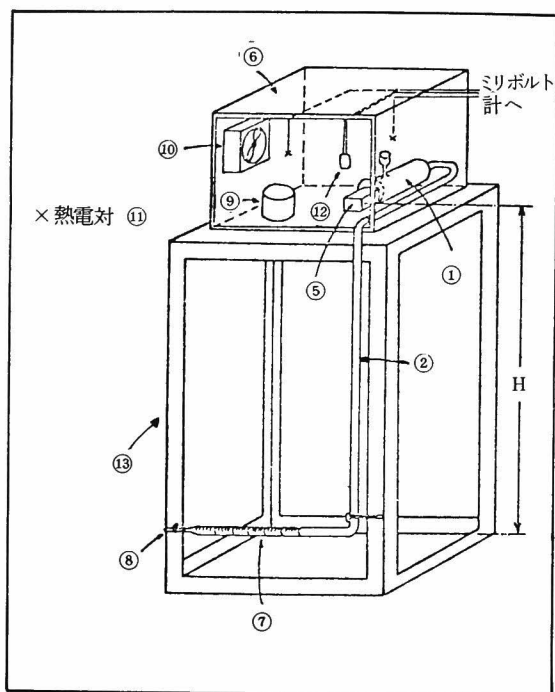


図6-2 含水率勾配による水分伝導率 D_{θ} の実験装置

基準重量，厚さを求めた。以上の操作により，試料内の含水率分布が求まる。

6-3-3 実験結果

1) 実験条件

実験条件を表 6-1 に示す。なお，各実験とも，切断時の蒸発等の影響が小さいことは，切

表 6-1 含水率勾配による水分伝導率 D_θ の測定条件

実験 No.	サクシオン (cm)	乾球温度 (°C)	相対湿度 (%)	蒸発速度 $\times 10^{-3}$ (g/cm ² , h)
1	122	22.5	40	0.53
2	52	9.0	53	0.80
3	85	20.0	40	9.82
4	48	20.0	40	17.28

断前の試料全重量に対する切断直後の水分を含めた試料重量の和の比率（回収率）が 98～99 %であるということより確認してある。

2) 含水率分布

図 6-3 に，実験 No. 1, 2 の，図 6-4，図 6-5 に，それぞれ実験 No. 3, 4 の定常状態における

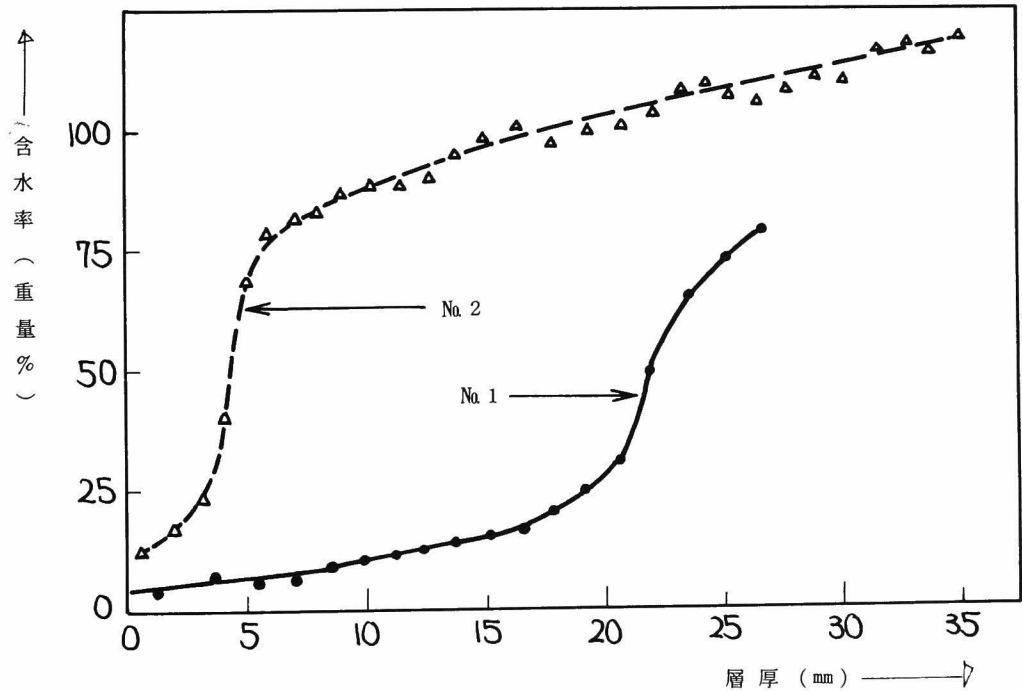


図 6-3 定常時含水率分布 (No. 1, 2)

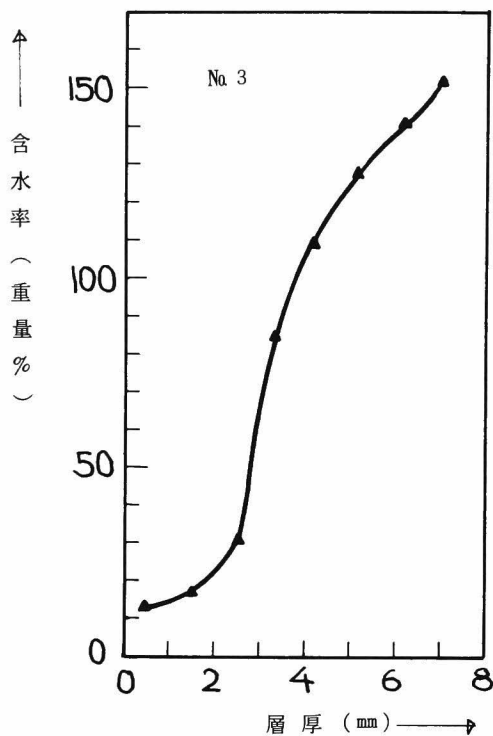


図 6-4 定常時含水率分布 (No. 3)

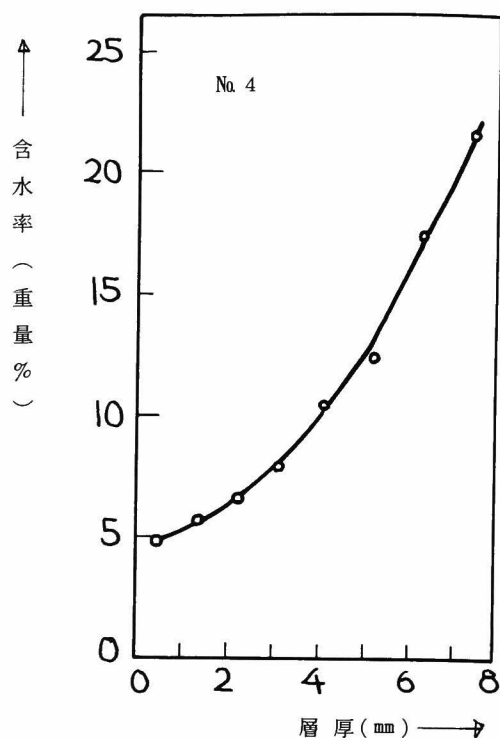


図 6-5 定常時含水率分布 (No. 4)

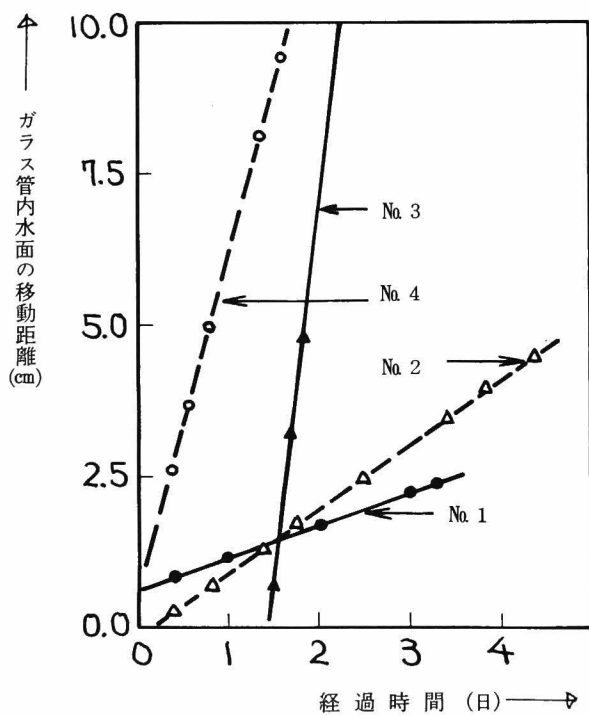


図 6-6 ガラス管内水面の移動距離

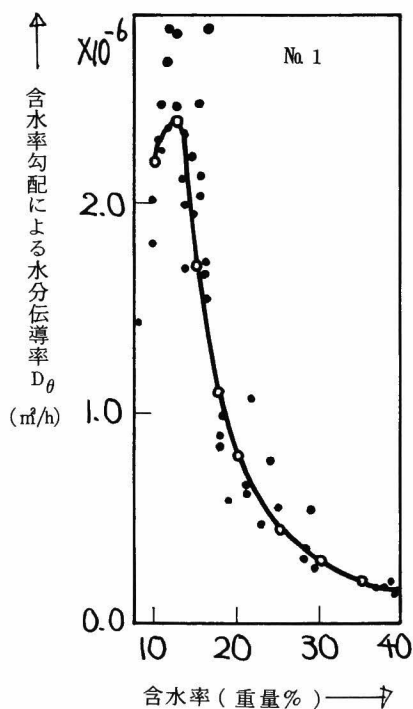


図 6-7 含水率勾配による水分伝導率 D_θ

含水率分布の測定結果を示す。

3) 蒸発速度

図6-6に、各実験におけるガラス管内水面の位置の時間変化を示す。図中の時刻移動距離は適当にずらして記してある。なお、4層の試料においては、実験開始後2～3日で定常が達成されることを確認してある。

4) 含水率勾配による水分伝導率 D_θ

D_θ は次のように決定した。まず、図6-3, 4, 5の含水率分布から順次5点ずつとり、それらに対する近似曲線（三次式）を最小二乗法により求め、その間の θ に関する $\partial\theta/\partial x$ を計算する。次の5点のうち1点だけをずらして、新たなる5点について同様の操作を行なう。したがって、同じ θ について何個かの異なる $\partial\theta/\partial x$ が求まるが、これらすべてから計算された D_θ を実験No. 1について図6-7に示す。これらの点に対して、実線に示すような平均的な曲線をひき、これを本実験から求めた D_θ 曲線とみなす。他の実験に対して同様に求めた D_θ 曲線を図6-8に示す。なお、測定No. 1, 2は、試料を4～5層重ねて行なった測定の結果であり、No. 3, 4は1層の試料についての結果である。

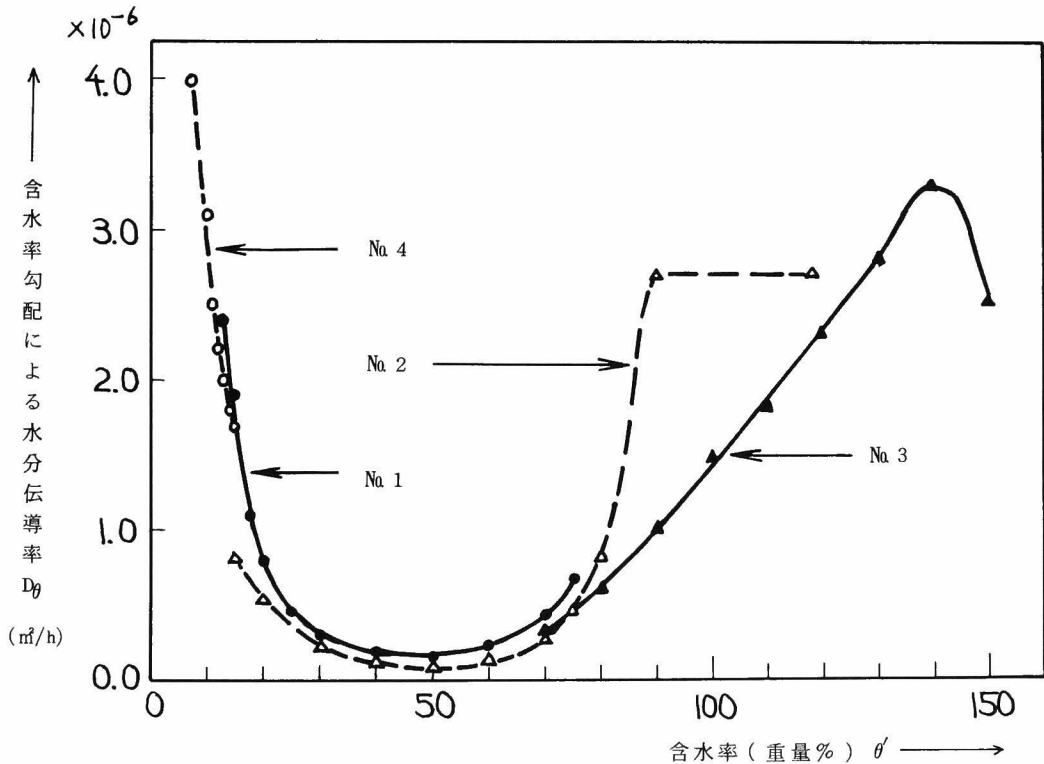


図6-8 含水率勾配による水分伝導率 D_θ

6-3-4 実験結果の考察

1) 含水率分布

図6-3から明らかなように、 $10 \leq \theta \leq 60$ (重量%)における内挿含水率分布曲線は十分滑らかにつながっており、試料層の接続部分が水分移動に対して十分小さな抵抗しか持たず、また接合部への液水の蓄積による含水率値への影響は考えなくてよいと思われる。さらに、含水率分布の滑らかさに加えて、回収率がかなりよいこと、次に述べる D_θ の値、傾向にかなりの一致が見られることから、試料切断による誤差はほとんどなかったと推定される。

2) 含水率勾配による水分伝導率 D_θ

図6-8から分るように、各実験の結果の D_θ は相当満足のゆくものであると思われる。 D_θ の測定は、他にも行なったが、 $\theta \leq 10$ (重量%)における値にかなりのばらつきが見られた。これは、この領域では図6-3の含水率分布からも分るように、 $\partial\theta/\partial x$ が小さいため、 θ の小さな違いが D_θ に大きな影響をもたらすためであった。この誤差を小さくするためには、 $\partial\theta/\partial x$ を大きくする必要がある、それには負圧の値を適当に変えて3~15%までの θ の変化が x の小さな範囲で生じるようにしなければならない。高含水率から低含水率まで生じる数層重ねた実験では、低含水率部分の $\partial\theta/\partial x$ を大きくすることは困難であったので1層のみの実験を行なった。その結果の含水率分布が図6-5であり、 D_θ の結果が6-8に示されている。なお、実験No.4である。また、同様なことから、高含水率分布においても、数層重ねた場合にはばらつきが見られた。そこで、実験No.3として1層のみの実験を行なった。その結果の含水率分布が図6-4である。水分分布の乱れは1層のみの実験においては無くなっている。

3) D_θ の温度変化

D_θ の温度変化については、 9°C 、 20.0°C 、 22.5°C について行なった。 20.0°C 、 22.5°C については明確では無いが、 9.0°C の測定値であるNo.2の D_θ の値は、他の実験の D_θ のどれよりも小さな値をとっている。このことから、温度の低下とともに D_θ は減少すると考えられる。なお、 9.0°C の高含水率部分は高い値をとっているが考察2)に述べたように数層の実験であり値に信頼がおけないので考察から省いた。

4) D_θ の測定における表面蒸発、内部蒸発による影響

D_θ の測定は等温状態を仮定して行なっている。しかし、現実には、表面での蒸発、内部での蒸発によって温度分布が生じているはずである。そこで、ここでは実際の測定条件のもとでどの程度の温度分布が生じ、その影響が D_θ にどう効くかを検討した。

a) 検討方針

熱水分同時移動の基礎式から、定常状態での一次元の熱と水分の流れを解く。この時、方程

式に現われる移動係数は等温であるとして求めた測定結果図 6-8 の D_θ と後述の結露過程の最終平衡時の含水率分布より求めた D_T ，およびこれらの水蒸気成分 D_{θ_v} ， D_{T_v} を用いる。この結果，得られた含水率分布から D_θ を逆算し，測定された D_θ と比較することによって蒸発による温度分布形成の影響を調べた。

b) 測定条件に対応する基礎式と境界条件

基礎式 (6-1)，(6-4) から定常状態と考えると次式が得られる。

$$D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} + D_T \frac{\partial T}{\partial x} = -q_w \quad (6-7)$$

$$(\lambda + LD_{T_v}) \frac{\partial T}{\partial x} + LD_{\theta_v} \frac{\partial \theta}{\partial x} = -q_h - Lq_w \quad (6-8)$$

ここで， q_w ， q_h は次式の境界条件で決定される定常水分流と顕熱流である。

境界条件は

$$\left. \begin{array}{ll} x = 0 \text{ で} & q_w = \alpha' (X_0 - X_{s1}) \\ x = \ell \text{ で} & \theta = \theta_\ell \end{array} \right\} \quad (6-9)$$

$$\left. \begin{array}{ll} x = 0 \text{ で} & q_h = \alpha (T_0 - T_{x=0}) \\ x = \ell \text{ で} & T = T_\ell \end{array} \right\} \quad (6-10)$$

である。ここで， X_0 ， T_0 は空気の， X_{s1} ， $T_{x=0}$ は表面のそれぞれ絶対湿度と温度である。

c) 数値計算の方法

次の差分化を行なって解いた。すなわち，(6-7) を

$$D_\theta^{i+\frac{1}{2}} \frac{\theta_{i+1} - \theta_i}{\Delta x} + D_T^{i+\frac{1}{2}} \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta x} = -q_w$$

と差分化する。したがって

$$-D_\theta^{i+\frac{1}{2}} \theta_i + D_\theta^{i+\frac{1}{2}} \theta_{i+1} - D_T^{i+\frac{1}{2}} T_i + D_T^{i+\frac{1}{2}} T_{i+1} = -\Delta x q_w \quad (i = 1, N-1) \quad (6-11)$$

ただし

$$D_\theta^{i+\frac{1}{2}} = D_\theta \left(\frac{\theta_i + \theta_{i+1}}{2} \right), \quad D_T^{i+\frac{1}{2}} = D_T \left(\frac{T_i + T_{i+1}}{2} \right) \quad (6-12)$$

全く同様に，(6-8) は

$$\begin{aligned} & - (LD_{\theta_v})^{i+\frac{1}{2}} \theta_i + (LD_{\theta_v})^{i+\frac{1}{2}} \theta_{i+1} - (\lambda + LD_{T_v})^{i+\frac{1}{2}} T_i \\ & + (\lambda + LD_{T_v})^{i+\frac{1}{2}} T_{i+1} = -\Delta x (q_h + Lq_w) \end{aligned} \quad (6-13)$$

ここで，

$$q_w = \alpha' (X_0 - X_{s1}) \quad (6-14)$$

$$q_h = \alpha (T_0 - T_1) \quad (6-15)$$

$$\theta_N = W_N \quad (6-16)$$

$$T_N = T_N \quad (6-17)$$

さらに、実際の計算においては、分割巾を小さくすることにより $D_\theta^{j+\frac{1}{2}} \doteq D_\theta^j$ とおいて（他の係数も同様）解いた。（6-11），（6-13）から

$$\theta_{i+1} = \theta_i - \frac{Dx}{P} [q_w (\lambda + LD_{Tv} - LD_T) - q_h D_T]_i \quad (6-18)$$

$$T_{i+1} = T_i - \frac{Dx}{P} [q_w (LD_\theta - LD_{\theta v}) + D_\theta q_h]_i \quad (6-19)$$

ただし、

$$P = [D_\theta (\lambda + LD_{Tv}) - D_T (LD_{\theta v})]_i$$

である。

d) 解法手順

まず表面の θ_1 を固定したままで T_1 を仮定する。（6-18），（6-19）より順次 θ_1, T_1 を求める。次に求められた T_N が境界条件の T_N に一致しなければ T_1 を仮定しなおして、 T_N に一致するまで計算を繰り返す。この計算法では、 T_N が一致した時に θ_N は必ずしも W_N に一致しないが、この場合には、計算によって得られた θ_N が境界条件として与えられた場合の解であると考ええる。

逐次近似における T_1 は次式により与える。

$$S - S_1^j = \frac{S_1^{j+1} - S_1^j}{T_1^{j+1} - T_1^j} (T_1 - T_1^j) \quad (6-20)$$

ここで、 S は計算された T_N と与えられた T_N との差を表わす。 $j+2$ 回目の計算における仮定値 T_1^{j+2} は、 $S = S^{j+2} = 0$ として次式より決定する。

$$T_1^{j+2} = T_1^j - S_1^j \frac{T_1^{j+1} - T_1^j}{S_1^{j+1} - S_1^j} \quad (6-21)$$

e) 計算結果と本測定に関する考察

計算は θ_1 について 4 種類（4.0, 4.2, 4.5, 5.0 重量%）について行なった。この θ_1 に対する水分流 q_w は、それぞれ 0.0159, 0.0347, 0.0573, 0.0846 (kg/m²h) である。これにより、蒸発速度および主要な蒸発面の位置における影響、温度形成の影響を調べた。結果の含水率分布を図 6-9 に示す。図 6-10 には、得られた含水率分布から D_θ を求めた結果（図中 D_θ' ）を示す。

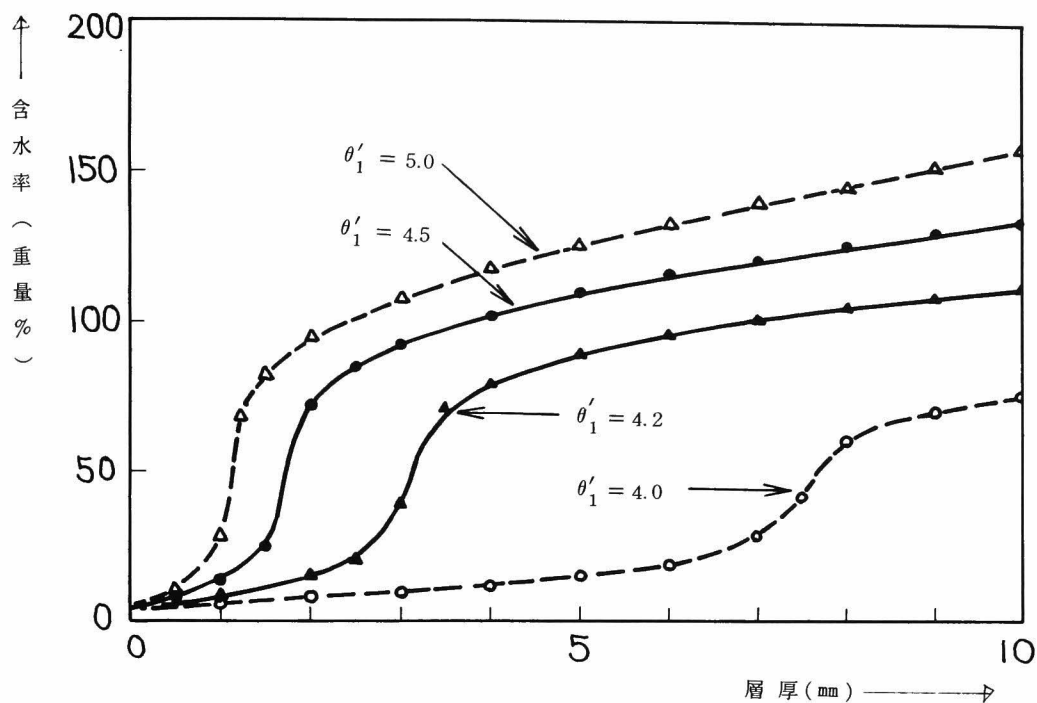


図6-9 含水率分布

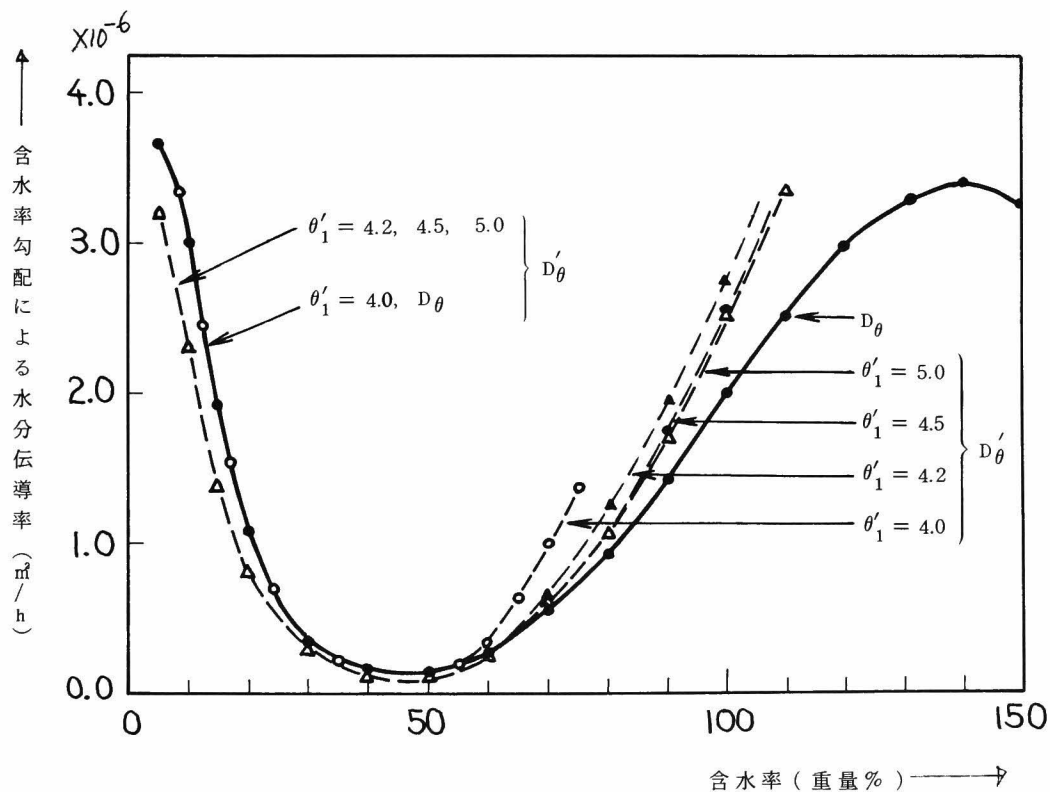


図6-10 含水率勾配による水分伝導率の測定に及ぼす内部蒸発の影響

図6-10から分るように、 D_θ と D'_θ との差が温度形成の結果の影響を示すのであるが、 $\theta'_1 = 4.0$ の場合は、他の三つの場合に比し、 D_θ と D'_θ との差は大きく、 $\theta \geq 60$ 重量%以上では D_θ の約2倍にもなっている。この時の温度低下は最大で 0.2°C であった。また、この状況を図6-9の含水率分布でみると、 $\theta'_1 = 4.0$ の場合は他の場合に比して、含水率分布が急激に上昇する部分、言いかえると主要な蒸発部分がかなり内部に入っていることが分る。以上の結果から見て、実験における条件によっては、温度低下が僅かであってもこの温度形成の影響が等温と考えた時の結果に大きく効くことが分る。

しかし、本実験の測定結果の含水率分布から判断して主要な蒸発面はそれ程内部に入っていないかったこと、実験結果の測定誤差と $\theta'_1 = 4.0$ 以外の場合の D_θ と D'_θ との差は同程度であることから、本実験において求められた D_θ は、妥当であると思われる。

6-4 含水率勾配による水分伝導率 D_θ の水蒸気成分 $D_{\theta v}$ と液水成分 $D_{\theta \ell}$ への分離⁶⁹⁾

D_θ を水蒸気、液水成分に分離する必要性は(6-4)に見られるように相変化にともなう凝縮熱による温度場の変化にある。また、この分離により、材料内の水分移動の形態が把握でき、さらに移動係数 D_θ 、 D_T の温度変化を定量的に推定する手段ともなり得る。以上のことから、この分離は材料内熱水分移動の機構を知る上で重要な要素である。

従来から分離の研究は種々なされているが問題点も多く、特に建築壁体に適用される方法は少ない。ここでは、まず代表的な分離方法について検討を行ない、我々が用いた方法を次に示す。

6-4-1 従来の分離法

1) Krischerの方法²⁷⁾

a) 水分移動の基礎式

Krischerの水分移動に対する基礎式は次式である。

$$q_w = q_v + q_\ell = -\lambda_v \nabla X - \lambda_\theta \nabla \theta \quad (6-22)$$

b) 決定のための実験

まず、試料を全面断湿した後、温度勾配をつけ平衡させる。このとき、材料内部で $q_w = 0$ であるから、(6-22)より

$$\lambda_v \frac{\partial X}{\partial x} = -\lambda_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x}$$

よって

$$\frac{\lambda_v}{\lambda_\theta} = - \frac{\frac{\partial \theta}{\partial x}}{\frac{\partial X}{\partial x}} \quad (6-23)$$

となる。したがって、試料内の含水率分布、温度分布および平衡含水率曲線からXを求めると(6-23)より λ_v/λ_θ が求められる。

次に、一定温度下での乾燥を行なう。(6-22), (6-23) から

$$\begin{aligned} q_w &= -\lambda_v \frac{\partial X}{\partial x} - \lambda_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} = -\lambda_\theta \left[1 + \frac{\lambda_v}{\lambda_\theta} \frac{\frac{\partial X}{\partial x}}{\frac{\partial \theta}{\partial x}} \right] \frac{\partial \theta}{\partial x} \\ &= -\lambda_\theta \left[1 + \frac{\lambda_v}{\lambda_\theta} \left(\frac{\partial X}{\partial \theta} \right)_T \right] \frac{\partial \theta}{\partial x} \end{aligned} \quad (6-24)$$

となるから、この実験により、全時刻 t 、全位置 x において、流量 q_w 、含水率 θ 、温度 T を求めれば、(6-24)とすでに求めた(6-23)の関係から λ_θ が求まる。さらに、(6-23)を用いると λ_v が得られる。

以上の方法により、Krischer は水蒸気移動に対する係数 λ_v と液水移動に対する係数 λ_θ を求め分離を行なっている。

我々の問題としている $D_{\theta v}$, $D_{\theta \ell}$ に対応させると次のようになる。

材料内では局所平衡を仮定しているから平衡関係

$$X = g(\theta, T) \quad (6-25)$$

が成立している。したがって、

$$\nabla X = \frac{\partial g}{\partial \theta} \nabla \theta + \frac{\partial g}{\partial T} \nabla T \quad (6-26)$$

(6-26) を (6-22) に代入すると

$$q_w = -\lambda_v \frac{\partial g}{\partial T} \nabla T - \left(\lambda_\theta + \lambda_v \frac{\partial g}{\partial \theta} \right) \nabla \theta \quad (6-27)$$

結局

$$D_{\theta \ell} = \lambda_\theta \quad (6-28)$$

$$D_{\theta v} = \lambda_v \frac{\partial g}{\partial \theta} \quad (6-29)$$

により、 $D_{\theta \ell}$, $D_{\theta v}$ が求められていることになる。

c) Krischer の方法の問題点

Krischer は水分移動を含水率勾配による液水の流れと水蒸気勾配による水蒸気の流れの和として考えている。したがって、我々の基礎式 (6-5) と (6-27) とを対応させてみると、温度勾配による液水の流れ ($-D_{T\ell} \nabla T$) が考慮されていないことが分る。すなわち、 $\lambda_v \frac{\partial g}{\partial T}$ は温度勾配による液水と水蒸気移動の両者を含んだものである。よって、Krischerの方法によって得られた λ_v は、水蒸気移動のみに対する係数ではなく液水と水蒸気の両成分を含んだものである。結局、Krischerの方法によっては液水と水蒸気成分の分離を行なうことはできない。

2) 塩類の水溶液を用いる方法⁴²⁾

a) 基本的な考え方

化学工学の分野において行なわれている方法で、材料内に塩類の水溶液を入れた後に乾燥を行なった場合、水分移動が液体の形で行なわれるならば、塩も水とともに移動し、内部蒸発が起って移動が水蒸気の形で行なわれれば、塩類はそのままその場所に留まるという現象を利用する。

b) 決定のための実験

一様の濃度の水溶液を含む試料の一端から乾燥させ、各時刻、各位置の水分量、塩濃度を求めることにより、全移動水分量、液状水分移動量を求め、それから逆算するとにより液水と水蒸気の移動割合を定める。

c) 問題点

この方法では、相当高い含水率領域でしか利用し得ないと考えられ、我々のような結露蒸発過程に生じる範囲に対しては不適当と思われる。

3) Jackson の方法⁴³⁾

a) 基本的な考え方

全拡散係数 D_θ を種々の空気圧力のもとで測定する。 D_θ の成分のうち、 $D_{\theta\ell}$ は圧力に依存せず、 $D_{\theta v}$ のみが圧力に依存し、その依存の仕方は $D_{\theta v}$ のうち D_{atm} のみによるとすると D_θ と圧力 P とのプロットから $D_{\theta\ell}$ 、 $D_{\theta v}$ を逆算できる。

b) 水分移動の基礎式 (等温系)

水蒸気流に対して

$$q_v = -D_{atm} \nu \beta \nabla \rho_v = -D_{atm} \nu \beta \frac{\partial \rho_v}{\partial \theta} \nabla \theta = -D_{\theta v} \nabla \theta \quad (6-30)$$

液水流に対して

$$q_\ell = -D_{\theta\ell} \nabla \theta \quad (6-31)$$

水分流に対して

$$q_w = q_v + q_\ell = - (D_{\theta v} + D_{\theta \ell}) \nabla \theta = - \left(D_{atm} \nu \beta \frac{\partial \rho_v}{\partial \theta} + D_{\theta \ell} \right) \nabla \theta \quad (6-32)$$

ここで、 β は空隙率と tortuosity を含む幾何学的係数である。(6-32)より

$$D_\theta = D_{\theta v} + D_{\theta \ell} = D_{atm} \nu \beta \frac{\partial \rho_v}{\partial \theta} + D_{\theta \ell} \quad (6-33)$$

と表現される。

ここで、 D_{atm} だけが圧力に依存し

$$D_{atm} \propto \frac{P_0}{P - p_v} \doteq \frac{P_0}{P} \quad (6-34)$$

ただし、 P_0 は基準圧力で、 P は周囲空気圧である。 $D_{\theta \ell}$ は圧力に依存しないとすると基準圧力 P_0 における D_{atm} を D_{atm}^0 とし、周囲圧力を P にした時の D_θ は

$$D_\theta = D_{\theta \ell} + D_{atm}^0 \nu \beta \frac{\partial \rho_v}{\partial \theta} \frac{P_0}{P} = D_{\theta \ell} + D_{\theta v}^0 \frac{P_0}{P} \quad (6-35)$$

ここで、 $D_{\theta v}^0$ は基準圧力 P_0 における $D_{\theta v}$ を示す。

c) 決定のための実験

等温定常実験のもとでの q_w , $\partial \theta / \partial x$ を測定し、 D_θ を決定する。同様な実験を種々の周囲空気圧 P において行なう。この結果を、(6-35)に適用して $D_{\theta \ell}$, $D_{\theta v}^0$ を求める。すなわち、今求めたい基準圧力 P_0 における $D_{\theta \ell}$, $D_{\theta v}$ が求められたことになる。

d) Jackson の方法の問題点

この方法は次節で述べる我々の方法と発想上同じものであり、圧力変化を考えるか温度変化を考えるかの違いだけである。最初に述べたように、水分移動機構を考える場合、特に我々の結露においては、移動係数の温度変化は重要な要素であり明確にする必要があること、また、この温度変化を知ることにより分離も可能となることから、温度変化を与えて D_θ を測定する方がより实际的であると思われる。また圧力変化を与える場合、材料および材料内空気、メニスカスの変形、さらに材料内含水率分布測定のための切断時の圧力変化による水分移動等問題点もあるように思える。

6-4-2 D_θ の温度変化より $D_{\theta v}$, $D_{\theta \ell}$ を求める方法⁶⁹⁾

1) 基本方針

D_θ は液、水蒸気両者を合わせた値であり、実験的には D_θ しか測定されず、さらに含水率によってもこれら二成分の割合は変化する。しかし、水分の移動形態が液か蒸気かによりその移動係数の温度変化も異なることから、両者を合わせた D_θ の温度変化を知ることより逆に各成分の割合を推定できる。この方法は、前述の Jackson の方法と発想上同じであるけれども、温度変化を与える測定の方が、各成分の温度変化も同時に推定できることから有用な方法と言えるだろう。

2) 水分移動の基礎式

材料内水分移動は、水蒸気移動と液水移動とが二相流として生じているとし、かつ、局所平衡が成立しているとする。ここで、水蒸気移動は Stefan の法則に、液水移動は未飽和流れに対して拡張された Darcy 則に従うとする。したがって、

水蒸気移動に対して

$$q_v = -D_{atm} \frac{P}{P - p_v} \beta \nabla \rho_v \quad (6-36)$$

液水移動に対して

$$q_\ell = -\rho_w K \nabla \Psi \quad (6-37)$$

ここで、水蒸気密度 ρ_v と Suction Pressure Ψ は

$$\rho_v = \rho_{v0} \exp \left[\frac{\Psi g}{RT} \right] = \rho_{v0} h \quad (6-38)$$

$$\Psi = \frac{2\sigma}{r} \frac{1}{\rho_w g} \quad (6-39)$$

なる関係を満足している。

また、飽和流れに対する Permeability K は

$$K = k \frac{\rho_w g}{\eta}$$

と置ける。ここで、 k は固有 Permeability [m^2] である。したがって、未飽和流に対してもこの特性が存在しているとして

$$K = \xi k \frac{\rho_w g}{\eta} \quad (6-40)$$

ここで、 ξ は含水率に比例する定数である。

(6-38) より

$$\nabla \rho_v = \nabla \left[\rho_{v0} \exp \left(\frac{\Psi g}{RT} \right) \right] = \frac{\rho_v g}{RT} \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \nabla \theta + \frac{\partial}{\partial T} \left[\rho_{v0} \exp \left(\frac{\Psi g}{RT} \right) \right] \nabla T$$

$$= \frac{\rho_v g}{RT} \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \nabla \theta + \left(\frac{d\rho_{v0}}{dT} h + \rho_{v0} \frac{\partial h}{\partial T} \right) \nabla T$$

ここで、 ρ_{v0} は温度のみに依存し、 h は含水率のみに依存するとすると

$$\begin{aligned} \nabla \rho_v &= \frac{\rho_v g}{RT} \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \nabla \theta + \frac{d\rho_{v0}}{dT} h \nabla T \\ &= \frac{\rho_{v0} h 2\sigma}{RT \rho_w} \frac{d}{d\theta} \left(\frac{1}{r} \right) \nabla \theta + \frac{d\rho_{v0}}{dT} h \nabla T \end{aligned} \quad (6-41)$$

また

$$\begin{aligned} \nabla \Psi &= \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \nabla \theta + \frac{\partial \Psi}{\partial T} \nabla T \\ &= \frac{2\sigma}{\rho_w g} \frac{d}{d\theta} \left(\frac{1}{r} \right) \nabla \theta + \frac{2}{rg} \left[\frac{1}{\rho_w} \frac{d\sigma}{dT} + \sigma \frac{d}{dT} \left(\frac{1}{\rho_w} \right) \right] \nabla T \end{aligned} \quad (6-42)$$

以上の関係から、(6-36)、(6-37) を温度 T と含水率 θ による式に変換すると

水蒸気移動に対して

$$\begin{aligned} q_v &= -D_{atm} \frac{P}{P - p_v} \beta \frac{\rho_{v0} h}{RT} \frac{2\sigma}{\rho_w} \frac{d}{d\theta} \left(\frac{1}{r} \right) \nabla \theta \\ &\quad - D_{atm} \frac{P}{P - p_v} \beta \frac{\alpha \rho_{v0}}{dT} h \nabla T \end{aligned} \quad (6-43)$$

液水移動に対して

$$q_\ell = -\xi k \frac{\rho_w}{\eta} 2\sigma \frac{d}{d\theta} \left(\frac{1}{r} \right) \nabla \theta - \xi k \frac{2\rho_w^2}{\eta r} \left[\frac{1}{\rho_w} \frac{d\sigma}{dT} + \sigma \frac{d}{dT} \left(\frac{1}{\rho_w} \right) \right] \nabla T \quad (6-44)$$

上式の各項の係数が、それぞれ $D_{\theta v}$ 、 D_{Tv} 、 $D_{\theta \ell}$ 、 $D_{T\ell}$ に対応している。ここで、これらを見ると、 D_{atm} 、 ρ_w 、 η 、 T 、 ρ_{v0} 、 σ のみが温度により変化し、他の因子は材料の空隙特性に帰因する。すなわち、含水率のみによって変化すると考えられる。

したがって、

$$D_\theta = D_{\theta v} + D_{\theta \ell} = D_{\theta v}^0 f_1(T) + D_{\theta \ell}^0 f_2(T) \quad (6-45)$$

$$D_T = D_{Tv} + D_{T\ell} = D_{Tv}^0 f_3(T) + D_{T\ell}^0 f_4(T) \quad (6-46)$$

と書ける。 $f_1 \sim f_4$ は温度により変化する因子であり、 $D_{\theta v}^0$ 、 $D_{\theta \ell}^0$ 、 D_{Tv}^0 、 $D_{T\ell}^0$ は含水率のみによって依存する因子である。 $f_1 \sim f_4$ の温度変化率はそれぞれ異なるので同じ含水率で二個の異なる温度に対する D_θ 、 D_T の値が分っていれば、(6-45) により $D_{\theta v}^0$ 、 $D_{\theta \ell}^0$ が、(6-46) により、 D_{Tv}^0 、 $D_{T\ell}^0$ が求められる。

また、このように分けることができると、両者の和である D_θ 、 D_T の温度による変化を各温度について測定しなくとも (6-45)、(6-46) より推定することができる。

3) 温度変化率 $f_1 \sim f_4$

(6-45)、(6-46) の $f_1 \sim f_4$ を (6-43)、(6-44) の温度によって変化する因子と対応させると

$$f_1(T) \propto D_{atm} \frac{P}{P-p_v} \frac{\rho_{v0}}{T} \frac{\sigma}{\rho_w} \quad (6-47)$$

$$f_2(T) \propto \frac{\sigma}{\eta} \rho_w \quad (6-48)$$

$$f_3(T) \propto D_{atm} \frac{P}{P-p_v} \frac{d\rho_{v0}}{dT} \quad (6-49)$$

$$f_4(T) \propto \frac{\rho_w^2}{\eta} \left[\frac{1}{\rho_w} \frac{d\sigma}{dT} + \sigma \frac{d}{dT} \left(\frac{1}{\rho_w} \right) \right] \quad (6-50)$$

となる。

以上の温度変化を表 6-2 に示す。また、図 6-11 に f_1 、 f_2 の温度変化 (20℃基準) を示す。

表 6-2 温度変化率

温度 (℃)	0.0	9.0	15.0	20.0	23.0	30.0
$f_1(T)$	1.00	1.94	2.94	4.11	4.99	7.78
$f_2(T)$	1.00	1.31	1.52	1.71	1.82	2.11
$f_3(T)$	1.00	1.91	2.90	4.05	4.94	7.80
$f_4(T)$	1.00	1.33	1.57	1.78	1.91	2.24

4) 軟質繊維板の D_θ の液、水蒸気成分の

分離 $D_{\theta v}$ 、 $D_{\theta \ell}$

上に述べた方法を図 6-8 の実験 No. 1 (22.5℃) と No. 2 (9.0℃) の D_θ に適用する。20 ≤ θ ≤ 45 (重量%) の範囲では前者は後者の約 2.5 倍で表 6-2 からすると全て蒸気で移動していると考えられる。また、 $\theta \geq 80$ (重量%) では液水での移動が大部分であると考えられる。このことから、液、水蒸気の圧倒的に移動する含水率領域を求め、その間の含水率に対しては適当に内挿すると図 6

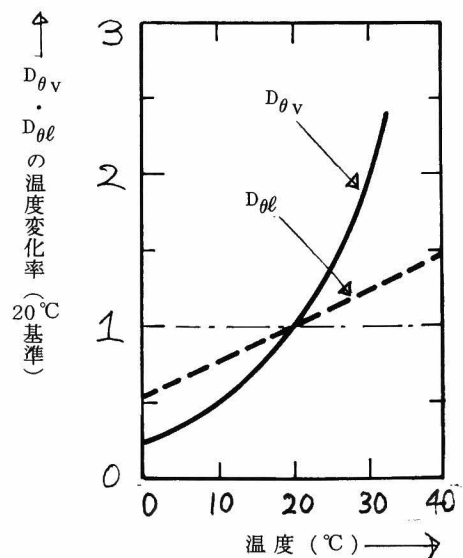


図 6-11 $D_{\theta v}$ 、 $D_{\theta \ell}$ の温度による変化

- 12のごとく $D_{\theta v}$, $D_{\theta \ell}$ が得られる。

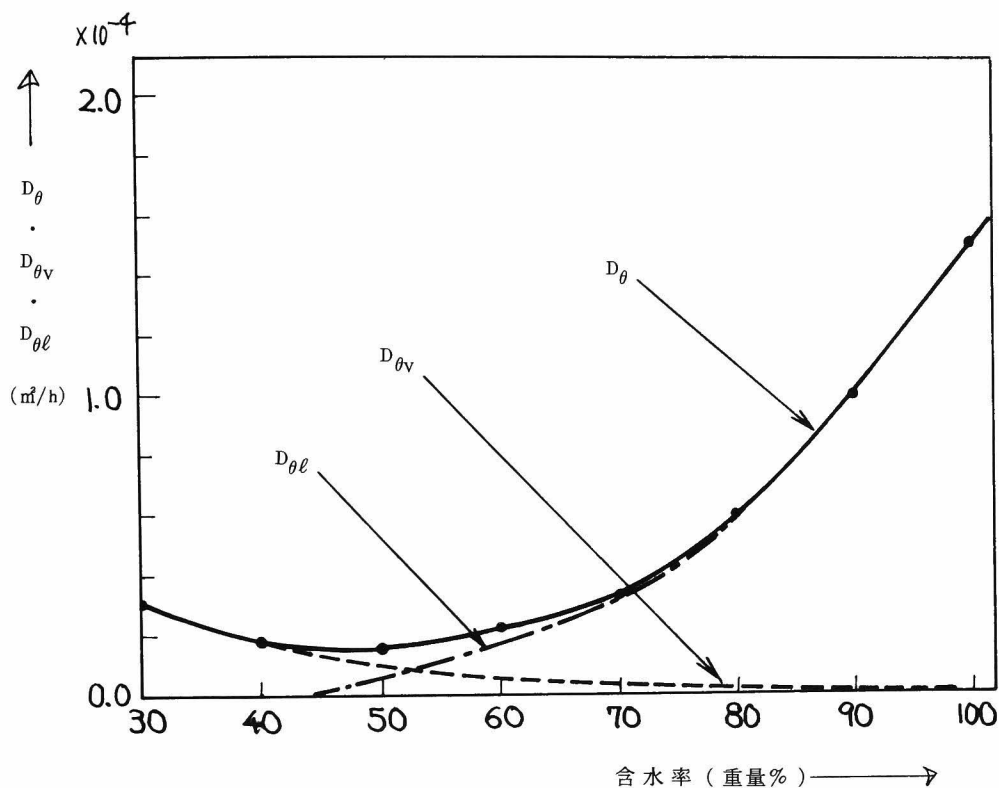


図 6-12 含水率勾配による水分伝導率 D_{θ} の液蒸気成分 $D_{\theta v}$, $D_{\theta \ell}$ への分離

この内挿の仕方の違いによる水分移動への影響については、次章 7-6 で検討する。

6-5 温度勾配による水分伝導率 D_T

6-5-1 測定方法

温度勾配による水分伝導率 D_T を直接求めることはできない。そこで、すでに求められた D_{θ} を使って求める方法が使用されている。

すなわち、(6-5)において、 $q_w = 0$ とすると

$$-D_{\theta} \nabla \theta - D_T \nabla T = 0$$

よって

$$\epsilon = \frac{D_T}{D_{\theta}} = - \frac{\nabla \theta}{\nabla T} \quad (6-51)$$

となる。したがって、材料内の水分移動が動的平衡 ($q_w = 0$) になっている時の含水率分布と温度分布とから温度勾配係数 ϵ を求めるならば、この ϵ と D_θ とより

$$D_T = \epsilon D_\theta \quad (6-52)$$

によって D_T が求められる。

6-5-2 温度勾配係数 ϵ

動的平衡時の温度勾配係数 ϵ の測定は二通り考えられる。すなわち、一定含水率の吸水を行なわせた後、試料を全面断湿し温度勾配をつけて動的平衡させる方法と、第5章の結露実験で片面断湿内部結露の条件下で最終平衡になった時の状態から求める方法である。本研究においては、両者から求めた ϵ について D_T を求め検討する。

1) 全面断湿によって ϵ を求める方法⁷²⁾

a) 実験装置とその方法

実験装置を図6-13に示す。図から分るように、同一条件のもとで同時に6個の試料について測定できる。図6-14に試料板を、図6-15に熱電対取付位置を示す。

実験の方法は、まず試料を飽水させた後、所定の含水率になるまで乾燥させる。乾燥した後の含水率分布ができるだけ一様になっているように、乾燥は高相対湿度 (RH 92%) の恒温恒湿槽中で行なった。次に、この試料を全面断湿するために、まずスーパーシーラントを約1mm施し、その上にパラフィン油を約2mm塗った。この状態で、さらに材料内初期含水率が一様になるように5日間前述の恒温恒湿槽の中に放置した。この後、試料を実験装置にセットし、等

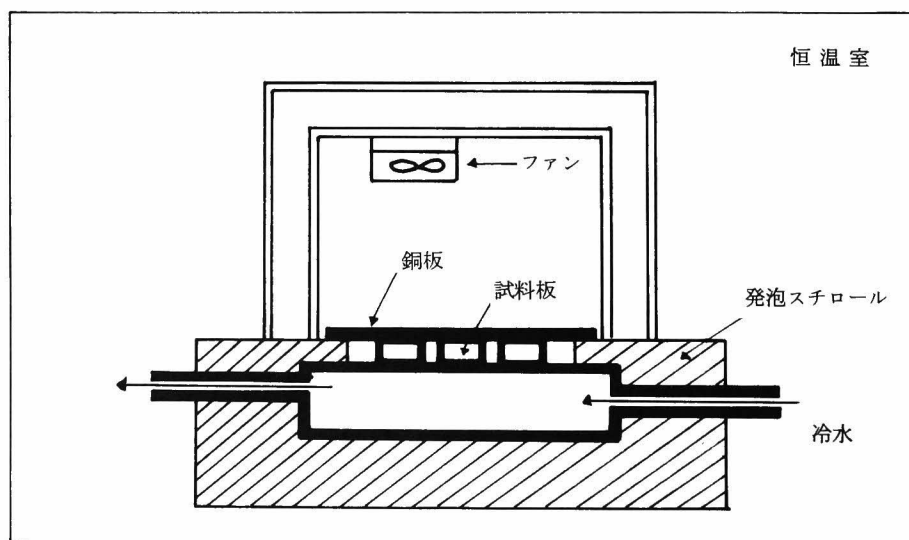


図 6-13 温度勾配係数 ϵ 測定装置

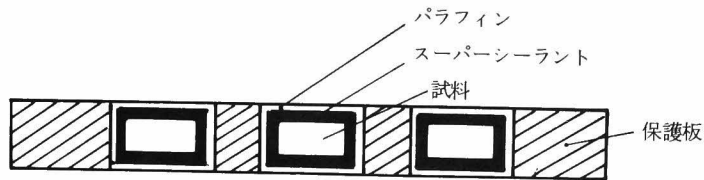


図6-14 試料板

温状態を確認した後下面側を所定の温度まで下げた。

表面温度は上下各3点で0.08mφのCu-Co熱電対を使用し、記録は μV の精度のデジタル記録計（サーモダックⅡ）を使用した。したがって、記録精度は $\pm 0.1^{\circ}C$ である。

6個の試料は、実験開始後順次時間経過とともに取りはずし、含水率分布を測定した。このことより、材料内での含水率分布の変化がなくなった状態を確認し、動的平衡時の含水率分布を見つけた。含水率分布の測定法は第5章5-3において述べた方法と同じである。

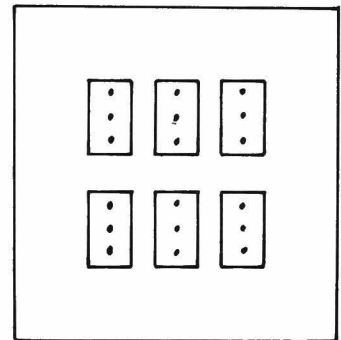


図6-15 熱電対取付位置

b) 実験結果

測定した試料6個のうち、4個は平均含水率が約80（重量%）、2個は60%のものである。80%のもの4個で平衡状態を確認し、60%のものは、80%の試料が平衡した時には平衡しているものと考えた。図6-16に、80%の場合の含水率分布の時間経過を示す。図から分るように、20日後と27日後とは、ほとんど変化がない。したがって、20日程度で動的平衡が生じていると見なしてよいであろう。図6-17に、60%の場合の含水率分布を示す。10日後と27日後では、ほとんど分布形に変化がない。平均含水率が小になると平衡に至る時間が早いことがわかる。以後の解析においては、27日後の値を動的平衡時のものとして使用する。

表面温分布は測定の結果 $\pm 0.1^{\circ}C$ 以内に入り一様と見なせよう。平衡時における両側温度差は $2.6^{\circ}C$ であった。また、材料内温度分布は、前もって別の試料で熱電対を試料内部に挿入し、同様な実験を行ない、我々がここで行なった約 $3^{\circ}C$ の表面温度差では測定精度以内で直線分布と見なしてよいことがわかった。

図6-18に、平均含水率が80%と60%の ϵ の結果を示す。 ϵ の計算において、含水率勾配は、6-3節において求めた方法により求め、温度勾配は直線分布として、(6-51)から ϵ を求めた。

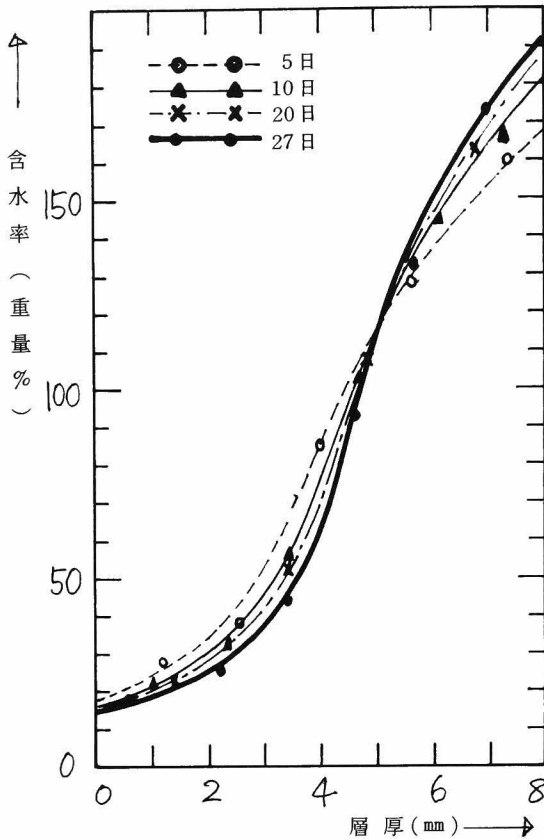


図 6-16 含水率分布の時間変化 (平均含水率 80 %)

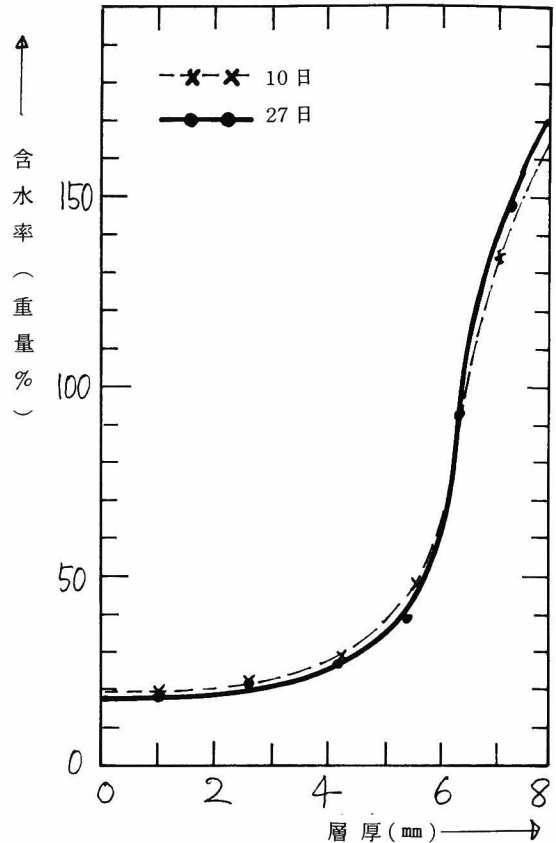


図 6-17 含水率分布の時間変化 (平均含水率 60 %)

図 6-18 から分るように、平均含水率が 80 % の場合と 60 % の場合とでは ϵ の値が異なっている。 ϵ は材料の特性値であるから一致しなければならない。この不一致の理由は、この方法によると材料内で放湿過程と吸湿過程が同時に存在することにより、ヒステリシスの影響が現われること、また全面断湿という状態が材料内での水分移動に対して影響を与えるためではないかとも考えられる。これらのことについては、今後明らかにする必要がある。この方法についての ϵ と一意性に対する疑問は松本によっても指摘されている⁵⁾。

2) 片面断湿内部結露実験より ϵ を求める方法

片面断湿で内部結露の条件下で実験を行なうと、最終的に材料内への吸湿が止むことはすでに第 5 章で述べた。この最終平衡時において、材料内の水分移動は $q_w = 0$ となっているはずである。このことから、最終平衡時の含水率分布と温度分布より ϵ を求めることができる。使用した実験結果は A-2 である。この実験における材料内温度分布は、次節 6-7 の熱伝導率の含水率による変化の測定結果図 6-27 と試料両表面温とから定常状態として計算して求めた。

結果の ε を図 6-19 に示す。この方法によって得られた ε は、結露過程すなわち吸湿過程のみで得られた結果であり、前述の全面断湿における問題はないと思われる。

6-5-3 温度勾配による水分伝導率 D_T

前節で求められた温度勾配係数 ε と D_θ とにより、(6-52) から D_T を求めた結果を図 6-20 に示す。三つの ε の測定値の違いにより当然のことであるが D_T も大きく差が生じている。しかし、三者とも $\theta \leq 45$ (重量%) ではほぼ一致していることが特徴として指摘できよう。

6-6 温度勾配による水分伝導率 D_T の水蒸気成分 D_{Tv} と液水成分 D_{Tl} への分離

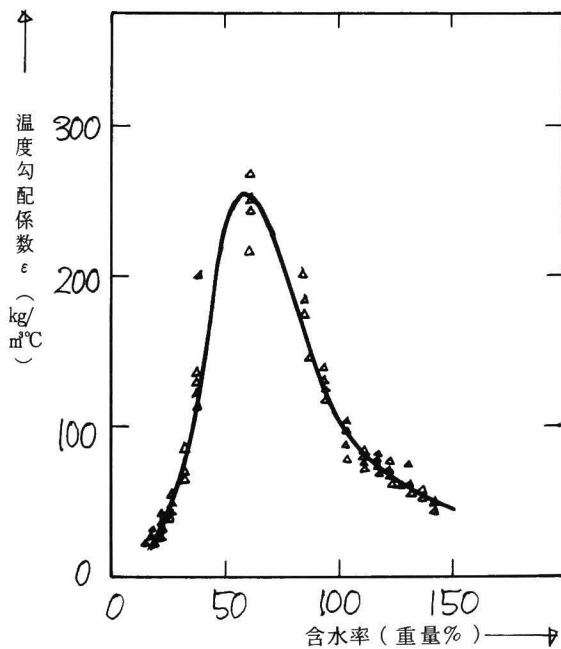


図 6-19 内部結露実験より求めた温度勾配係数

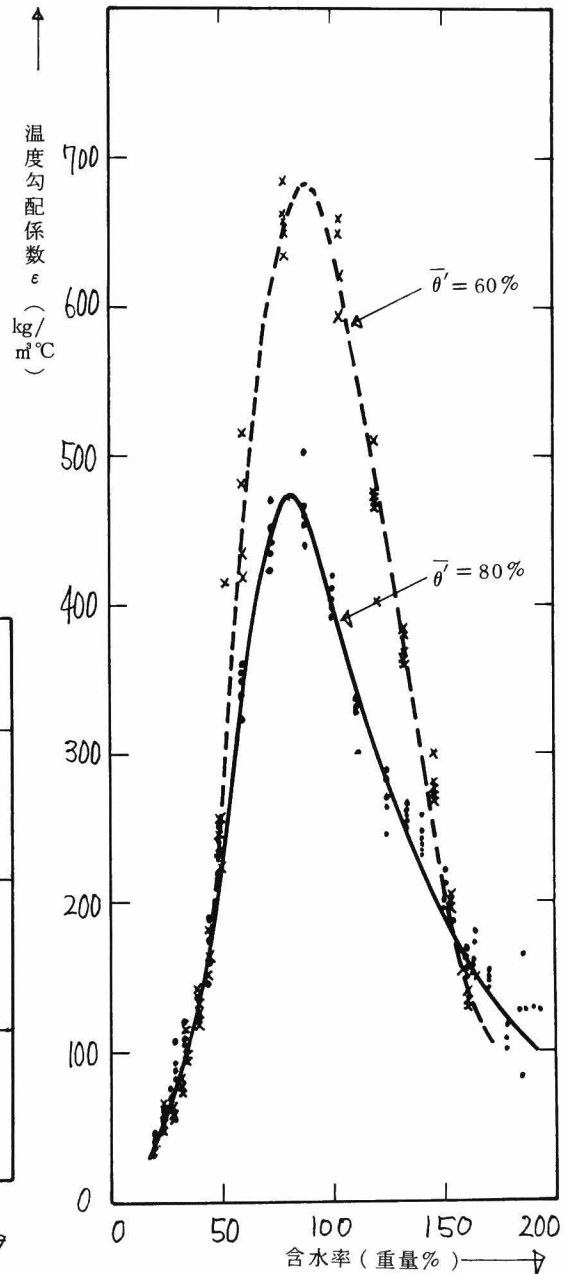


図 6-18 全面断より求めた温度勾配係数

6-6-1 分離方法

(6-2), (6-3) から明らかなように

$$D_{\theta v} = k_v \frac{\partial g}{\partial \theta}$$

$$D_{Tv} = k_v \frac{\partial g}{\partial T}$$

よって

$$D_{Tv} = D_{\theta v} \frac{\frac{\partial g}{\partial T}}{\frac{\partial g}{\partial \theta}} \quad (6-53)$$

となり, $D_{\theta v}$ と平衡含水率関係 $g(\theta, T)$ を使用することにより D_{Tv} が得られる。

D_{Tv} が得られれば

$$D_{T\ell} = D_T - D_{Tv} \quad (6-54)$$

により $D_{T\ell}$ も求まる。

6-6-2 温度勾配による水分伝導率 D_T の液, 蒸気成分 D_{Tv} , $D_{T\ell}$

前述の方法によって得た D_{Tv} , $D_{T\ell}$ を

図 6-21 に示した。ただし, 内部結露より得られた D_T のみの分離結果を示している。

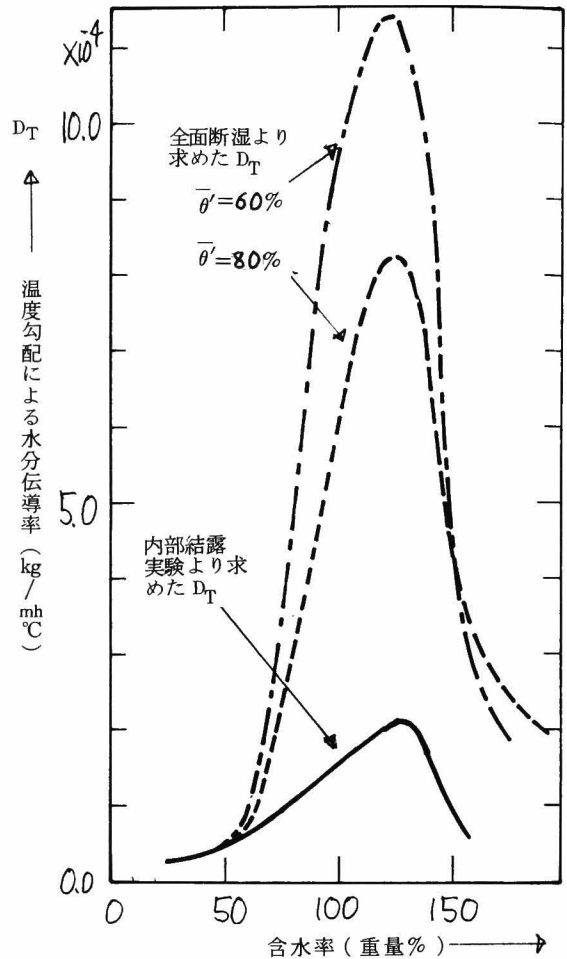


図 6-20 温度勾配による水分伝導率 D_T

6-7 含水率による熱伝導率 λ の変化^{71,73)}

結露障害防止を考える場合, 材料内の含水率変化を知る必要がある。この時含水率とともに熱伝導率も大きく変化する。したがって, この熱伝導率の変化は結果に大きく影響する。よって, この熱伝導率の含水率による変化は重要な要素である。この熱伝導率の測定は, 土質工学, 乾燥工学, 機械工学等の分野で多くなされているが, 測定された熱伝導率がどのようなものであるのか, またそれをどのような目的に使用するかについてはそれ程明確にされているとはいえない。また, これらの測定において, 水分の影響をできるだけ小さくするためにということで測定法に工夫がなされているが, 水分の影響を定量的に把握しているものはほとんどないと

思われる。このことは、材料内熱水分移動の機構の解明が十分為されていないことによると考えられ、移動の確立とともに、誤差評価も含む熱伝導率測定法の研究が待たれる。

我々はこの熱伝導率の測定法について現在検討を行なっている。未だ十分な解析にいたっていないが、周期法により測定した結果をここで示し、後の熱水分同時移動方程式の検討に用いる。

6-7-1 周期法による測定法と得られる熱伝導率

周期法による測定は、材料に周期入力を与えることにより、材料内での水分移動の影響を小さくし、定常状態における材料内2点間の位相および振幅の差を測定することにより熱伝導率を求める方法である。ここで得られる熱伝導率とは以下のものである。

(6-4)を書き直すと

$$\begin{aligned} & \left(Cr + La r_g \frac{\partial g}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial t} + \left(La r_g \frac{\partial g}{\partial \theta} \right) \frac{\partial \theta}{\partial t} \\ & = \nabla \cdot [(\lambda + LD_{Tv}) \nabla T] + L \nabla \cdot (D_{\theta v} \nabla \theta) \end{aligned} \quad (6-55)$$

となり、周期法によって小さくできる水分移動の影響は、左辺第2項の $L \nabla \cdot (D_{\theta v} \nabla \theta)$ であり、この方法によって得られるのは λ ではなく、 $\lambda^* = \lambda + LD_{Tv}$ である。ここでの λ は材料構成要素（実質部、液、空気）を通じての熱伝導によって決まる熱伝導率である。熱水分同時移動方程式を取り扱うかぎりにおいて(6-55)から明らかなように λ を求めるのではなく λ^* を求めておけば十分である。しかし、すでに前節において述べたごとく、 D_{Tv} は温度、含水率により大きく変化すること、 λ そのものは水分移動の影響を取り除いたものであり、材料構成要素の結合の仕方、液水配置の様子等についての情報を与えることから、 λ そのものの値を求めることは有用なことと思われる。

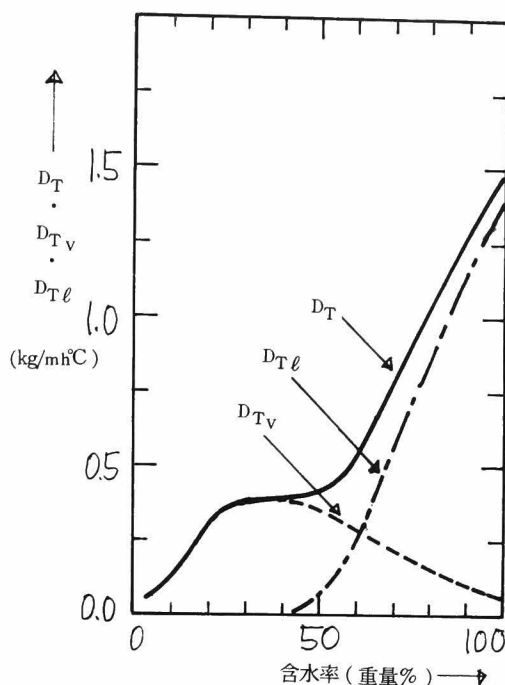


図6-21 温度勾配による水分伝導率 D_T の液蒸気成分 D_{Tv} , D_{Tl} への分離

6-7-2 測定法に用いられる基礎式

(6-1), (6-4)において, $ar_g = 0$ とおき, 材料物性値を一定とすると

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = (D_{\theta v} + D_{\theta \ell}) \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + (D_{T \ell} + D_{T v}) \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (6-56)$$

$$Cr \frac{\partial T}{\partial t} = (\lambda + LD_{T v}) \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + LD_{\theta v} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (6-57)$$

となる。ここで, 周期法による初期および境界条件は, 材料を半無限として考え, 材料の表面に正弦波入力がある場合として

$$\begin{aligned} \text{初期条件} \quad t = 0 \text{ で} \quad \theta &= 0 \\ T &= 0 \end{aligned} \quad (6-58)$$

$$\text{境界条件} \quad x = 0 \text{ で} \quad (D_{\theta \ell} + D_{\theta v}) \frac{\partial \theta}{\partial x} + (D_{T v} + D_{T \ell}) \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (6-59)$$

$$x = +\infty \text{ で} \quad \theta = \text{有限} \quad (6-60)$$

$$x = 0 \text{ で} \quad T = \sin \omega t \quad (6-61)$$

$$x = +\infty \text{ で} \quad T = \text{有限} \quad (6-62)$$

である。ここで, θ , T は初期含水率 θ_0 , 初期温度 T_0 により基準化した含水率, 温度である。

(6-56), (6-57) は線型連立微分方程式であり, この時の条件下での周期的定常解は,

$$\begin{aligned} \theta(x, t) &= \alpha_1 E e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2}} \alpha_1 x} \cdot \sin [\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2}} \alpha_1 x] \\ &\quad - \alpha_2 E e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2}} \alpha_2 x} \cdot \sin [\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2}} \alpha_2 x] \end{aligned} \quad (6-63)$$

$$\begin{aligned} T(x, t) &= \alpha_1 \frac{E}{B} E_1 e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2}} \alpha_1 x} \cdot \sin [\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2}} \alpha_1 x] \\ &\quad - \alpha_2 \frac{E}{B} E_2 e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2}} \alpha_2 x} \cdot \sin [\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2}} \alpha_2 x] \end{aligned} \quad (6-64)$$

ここで

$$E = \frac{B}{(\alpha_1 - \alpha_2) [C - (AC - BD)(\alpha_1^2 + \alpha_1 \alpha_2 + \alpha_2^2)]}$$

$$E_1 = C - (AC - BD) \alpha_1^2$$

$$E_2 = C - (AC - BD) \alpha_2^2$$

$$\alpha_1, \alpha_2 \text{ は } (AC - BD) \alpha^4 - (A + C) \alpha^2 + 1 = 0 \text{ の正根 } (\alpha_1 < \alpha_2)$$

$$A = D_\theta, \quad B = D_T, \quad C = \frac{\lambda + LD_{T v}}{Cr}, \quad D = \frac{LD_{\theta v}}{Cr}$$

通常の場合、(6-64)の右辺第2項は、第1項に比して圧倒的に小さいと見なせるから第1項のみを考慮し、材料内の2点 x_1 , x_2 における位相差 ϕ をとると

$$\phi = \sqrt{\frac{\omega}{2}} \alpha_1 x_1 - \sqrt{\frac{\omega}{2}} \alpha_1 x_2$$

したがって、

$$\alpha_1 = \frac{\phi}{\sqrt{\frac{\omega}{2}} (x_1 - x_2)} \quad (6-65)$$

また、一般に $\alpha_1 \doteq \frac{1}{\sqrt{a}}$ となるので、すなわち、温度伝導率 $a = (\lambda + LD_{Tv})/Cr$ の記号を使うと

$$\alpha_1 \doteq \frac{1}{\sqrt{a}} \quad (6-66)$$

よって、(6-65), (6-66) より

$$a = \left(\frac{\lambda + LD_{Tv}}{Cr} \right)^2 = \frac{1}{\phi^2} \left(\frac{\omega}{2} \right) (x_1 - x_2)^2 \quad (6-67)$$

となり、材料内の2点 x_1 , x_2 における位相差を測定することにより、 a 、したがって、 $\lambda + LD_{Tv}$ が得られる。

また、同様にして、振幅の減衰からも得ることができる。すなわち、振幅減衰率を η とすると

$$\eta = \frac{\alpha_1 \frac{E}{B} E_1 e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2}} \alpha_1 x_1}}{\alpha_1 \frac{E}{B} E_1 e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2}} \alpha_1 x_2}} = e^{\sqrt{\frac{\omega}{2}} \alpha_1 (x_1 - x_2)}$$

$$\ell n \eta = \sqrt{\frac{\omega}{2}} \alpha_1 (x_1 - x_2)$$

よって

$$a = \left(\frac{\lambda + LD_{Tv}}{Cr} \right)^2 = \frac{1}{(\ell n \eta)^2} \left(\frac{\omega}{2} \right) (x_1 - x_2)^2 \quad (6-68)$$

により、 a が求められる。

6-7-3 実験

ここでは、乾燥状態と含水率が170(重量%)の二つの場合について実験を行ない、 $a = (\lambda$

$+LD_{TV})/Cr$ を求め λ を推定する。

1) 実験装置

実験装置の概略を図 6-22 に示す。この装置全体を恒温室に入れ一定温湿度のもとで測定する。

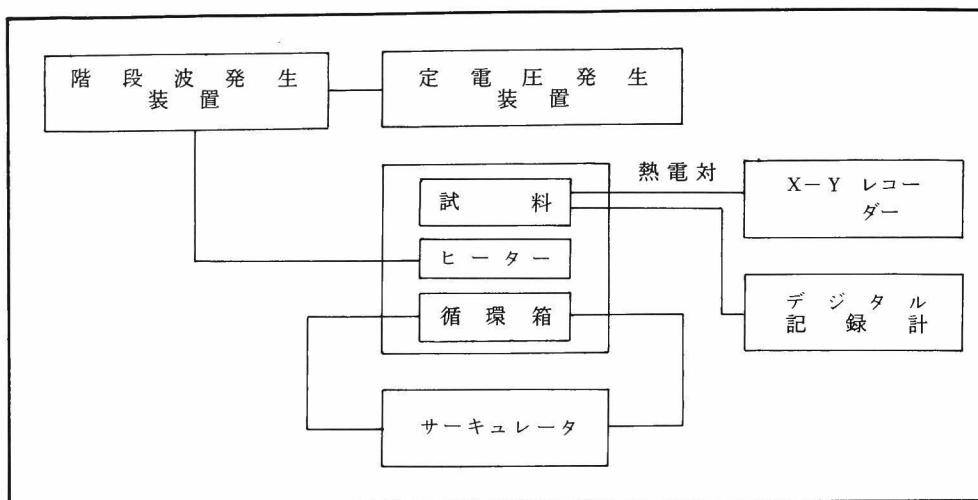


図 6-22 熱伝導率測定法の概略

周期的階段波発生装置は、定電圧発生装置 (30V, 10A) から一定の電流をリレーにより ON-OFF し、ヒータ入力として周期的階段波を発生させるようになっている。リレーの周期的な ON-OFF はタイマー (0~30 秒の調節が可能) を 2 個組み合わせる事により行なう。

実験装置の詳細を図 6-23 に示す。電子冷却式サーキュレータにより一定の低温度に制御された冷却液をアルミ製循環箱 (20×20×3.4 cm) 中に通し、ヒーター加熱による試料平均温度

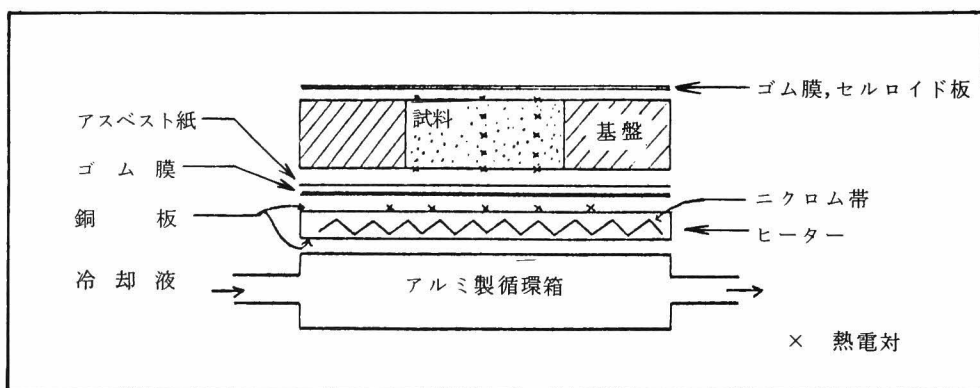


図 6-23 熱伝導率測定装置

の上昇を調節する。循環箱の上にヒーター、減衰層、試料を順次おき、その上にさらに上部恒温室内空気の温度変化の試料への影響を小さくするためにゴム膜、セルロイド板等を置く。ヒーターにおいては、階段状電流により階段状温度波が発生するが、ヒーターと試料の間の減衰層（ゴム膜、アスベスト紙）を通過する間に正弦波に近くなり試料面に達する。試料には、熱電対が挿入され記録装置に連結する。

記録装置は、X-Yレコーダとデジタル式記録計を用いた。デジタル記録計は長時間にわたる多点の記録に、X-Yレコーダは短時間の波形記録に用いた。

ヒーターは、幅約 1.5 mm、厚さ 0.075 mm のニクロム帯を約 0.5 mm の間をおいて折り返して配列し（幅 180 × 180 mm）、その両側に絶縁層（セクションペーパー、メンディングテープ）を設け、厚さ 0.5 mm の銅板でとじたものである。

試料は、57.3 × 57.3 mm 厚さ 9.05 mm の軟質繊維板を、基盤は試料の同種の軟質繊維板を用いている。

熱電対は、0.08 m φ の Cu-Co 熱電対を用いた。試料の厚さ方向に上下表面の 2 点、内部のほぼ 2 mm 間隔に 3 点の計 5 点を同じ水平位置（試料ほぼ中央と試料端から 12 mm の 2 列）に試料側面から挿入した。また、水平温度分布は、ヒーター上面の銅板上に 5 点、試料上下面、端から 5 mm のところにさらに 1 点ずつ設置した熱電対により測定した。

2) 実験結果

まず、試料内熱電対位置の決定を行なう。ほぼ等間隔になるように熱電対埋め込みを行なったが、正確な位置の決定は、試料に温度勾配をつけたときに水分の影響が無ければ、定常状態において温度分布が直線になることを利用して行なう。

測定は、一定温度の恒温室内に装置全体を入れ、ヒーターおよび循環液を一定の高温度に保ち、温度勾配を作り定常状態になるのを確認して行なった。この時、試料全体を周囲空気温より高温に保つことにより、試料への結露を避け水分の影響を除いた。測定例を図 6-24 に示す。この時の熱電対の位置は試料ほぼ中央での表面 2 点、内部 3 点である。上下温度差は約 12 °C であった。熱電対挿入が完全に水平でない等の影響がどれ程あるかをみる為、同じ条件下で試料を裏返しにした時の結果をも同時に示す。両者の一致は満足のいくものであり、熱電対の位置決めは精度良くなされているものと考えられる。

a) 乾燥時温度伝導率

測定条件は $\omega = 0.265 \text{ (rad/sec)} = 954 \text{ (rad/h)}$

周期約 24 秒、 試料平均温 25.2 (°C)、 入力温度振幅 0.338 (°C)

測定結果を図 6-25 に示す。左側が $x = 0 \text{ mm}$ （下表面）の温度を、右側は $x = 2.06 \text{ mm}$ の

温度を示している。x = 2.06 mmでの温度波形の乱れは、リレーのON-OFFによる雑音である。

1 ペンの為、切り換え操作により 2 点の記録を行っており、図は同じ時間軸上の値である。周波数分析は行っていないが、目視では正弦波という条件はほぼ満足されていると言えよう。図から

$$\text{振幅減衰率 } \eta = 0.1574$$

$$\ell n \eta = -1.848$$

$$\text{位相差 } \phi = 1.88 \text{ (rad)}$$

が得られる。したがって、(6-67), (6-68) より

振幅法では

$$a = \frac{1}{(\ell n \eta)^2} \left(\frac{\omega}{2} \right) (x_1 - x_2)^2 = 5.93 \times 10^{-4} \text{ (m}^2/\text{h)}$$

位相法では

$$a = \frac{1}{\phi^2} \left(\frac{\omega}{2} \right) (x_1 - x_2)^2 = 5.72 \times 10^{-4} \text{ (m}^2/\text{h)}$$

となる。両者の差は、3.7%であり測定の妥当性を示していると言えよう。

b) 湿潤時の温度伝導率

試料の作成は、乾燥時の温度伝導率の測定に用いた試料を水に浸み込ませ、周囲をセメダイン、パラフィンにより断湿した。なお、この操作時に、試料内熱電対の一部が切れたため、試

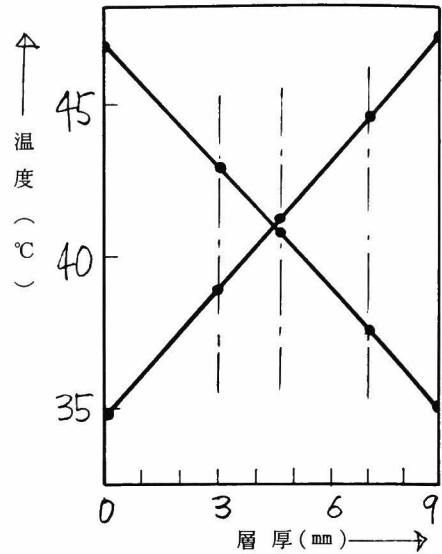


図 6-24 材料内熱電対位置

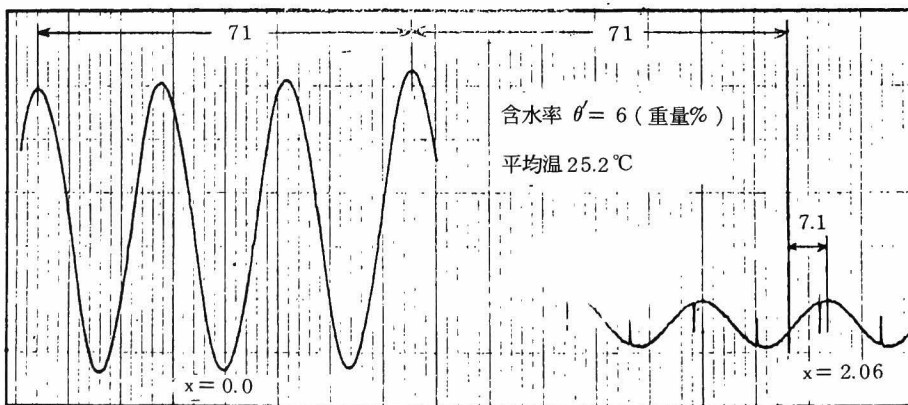


図 6-25 $\theta' = 6$ (重量%) における温度変動

料側面から約 12 mm の位置に挿入した熱電対により解析を行なう。

測定条件は、

$$\omega = 0.265 \text{ (rad/sec)} = 954 \text{ (rad/h)} \quad \text{周期約 24 秒}$$

$$\text{試料平均温} \quad 26.9 \text{ (}^{\circ}\text{C)}$$

$$\text{入力温度振幅} \quad 0.338 \text{ (}^{\circ}\text{C)}$$

測定結果を図 6-26 に示す。右側が $x = 0 \text{ mm}$ ，左側が $x = 2.13 \text{ mm}$ での値である。図から

$$\text{振幅減衰率} \quad \eta = 0.09259$$

$$\ln \eta = -2.3796$$

$$\text{位相差} \quad \phi = 3.836$$

よって、温度伝導率は

$$\text{振幅法では} \quad a = 3.82 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{/h)}$$

$$\text{位相法では} \quad a = 3.61 \times 10^{-4} \text{ (m}^2\text{/h)}$$

両者の差は、5.4 % であり妥当な測定と思える。

6-7-4 含水率による熱伝導率 λ の変化

前節において、乾燥時と湿潤時 (170 重量%) の温度伝導率 a を求めた。したがって、 $a = (\lambda + LD_{TV})/Cr$ の関係から $\lambda + LD_{TV}$ を求める。

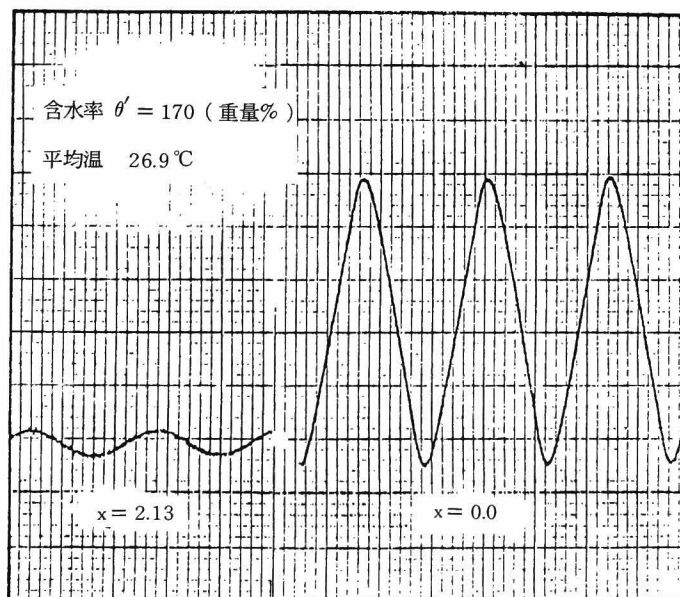


図 6-26 $\theta' = 170$ (重量%) における温度変動

ここで,

$$Cr = C_s r_s + C_w r_w = C_s r_s + 1 \times \frac{\theta}{100} r_s = r_s \left(C_s + \frac{\theta}{100} \right)$$

$$r_s = 240 \text{ kg/m}^3, \quad C_s = 0.44 \text{ (Kcal/kg}^\circ\text{C)}, \quad \theta' = 170 \text{ (重量\%)}$$

であるから

$$\theta' = 170 \text{ のとき} \quad Cr = 514 \text{ Kcal/m}^3\text{}^\circ\text{C}$$

$$\theta' = 6 \text{ のとき} \quad Cr = 106 \text{ Kcal/m}^3\text{}^\circ\text{C}$$

よって, $\lambda + LD_{TV}$ は

$$\theta' = 170 \text{ のとき} \quad \lambda + LD_{TV} = 0.190 \text{ (Kcal/m h}^\circ\text{C)}$$

$$\theta' = 6 \text{ のとき} \quad \lambda + LD_{TV} = 0.0612 \text{ (Kcal/m h}^\circ\text{C)}$$

LD_{TV} は $\theta' = 6$ のとき約 0, $\theta' = 170$ のときは, 図 6-20 からほぼ零とみなせる。

したがって,

$$\theta' = 170 \text{ のとき} \quad \lambda = 0.190 \text{ (Kcal/m h}^\circ\text{C)}$$

$$\theta' = 6 \text{ のとき} \quad \lambda = 0.0612 \text{ (Kcal/m h}^\circ\text{C)}$$

他の θ について測定は行なっていないので, 上記の値を直線で結び, 他の θ' に対する熱伝導率を近似した。その結果を図 6-27 に示す。

なお, この近似についての検討は, 次章 7-6 で行なう。

6-8 第 6 章のまとめ

本章において, 解析に用いる熱水分移動方程式の決定について述べた。以下に結果をまとめる。

1) 含水率勾配による水分伝導率 D_θ

i) 等温定常測定法に基づいて測定を行なった。1 回の測定で全範囲の D_θ を求めることは出来なかったので数回の測定によって求めた。各回の測定結果には多少のばらつきが見られるものの, 各回の測定により全範囲の D_θ が満足のゆく精度で得られた。

ii) 等温条件は二種類行なったが, D_θ の値が低い含水でも温度の違いにより明確な差が見られた。

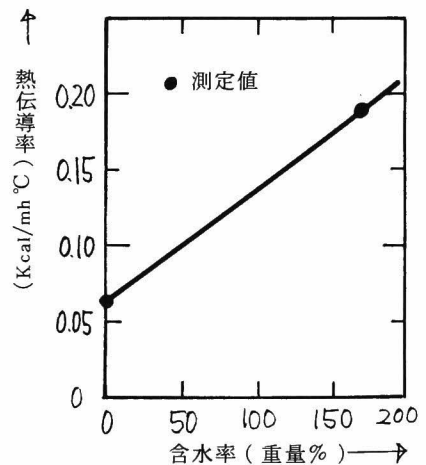


図 6-27 熱伝導率の含水率変化

iii) 等温条件下ではあるが、材料内水分移動のために蒸発の潜熱の影響があり、その結果材料内に温度分布が生じる。 D_θ を求める場合に等温で計算している。したがって、生じた温度分布の影響を検討しておかねばならない。検討の結果、測定条件によってはかなり大きな影響が現われることが明らかとなった。しかし、我々が行なった測定条件は蒸発の影響の少ない条件であり、等温として求めて良いことが示された。

2) 含水率勾配による水分伝導率の液、蒸気成分への分離

- i) 従来の分離法について検討を行なった。
- ii) D_θ の温度変化から分離を行なう方法を提案した。
- iii) その結果、 $\theta' < 45$ 重量%において水蒸気成分が圧倒的であり、 $\theta' > 80$ 重量%で液水成分が圧倒的であった。 $45 < \theta' < 80$ 重量%において液・蒸気成分が共存する。
- iv) 共存する範囲における分離は内挿によって求めた。

3) 温度勾配による水分伝導率 D_T

- i) D_T は温度勾配係数 ϵ と D_θ とから求められる。
- ii) 温度勾配係数 ϵ を全面断湿による平衡状態と内部結露実験の平衡状態の二通りから求めた。
- iii) 全面断湿から求めた ϵ は材料内平均含水率によっても異なること、内部結露実験より求めた ϵ の数倍であることが明らかとなった。

4) 温度勾配による水分伝導率の液・蒸気成分への分離

- i) 水蒸気成分は次の方法で求めた。すなわち、材料内水蒸気移動は水蒸気濃度（ここでは絶対温度）勾配によって表現できる。この移動式を平衡含水率関係を用いて含水率勾配と温度勾配による移動に変形した時の係数の関係から、 $D_{\theta V}$ と平衡含水率曲線を用いて D_{TV} が決定される。

- ii) 液水成分 $D_{T\theta}$ は温度勾配係数 ϵ より求めた D_T と D_{TV} とから求めた。

5) 含水率による熱伝導率の変化

- i) 周期法によって熱伝導の測定を行なった。
- ii) 乾燥状態と $\theta = 170$ 重量%における値を得た。中間の含水率による熱伝導率の値は直線で内挿することによって求めた。

第 7 章 結露過程における熱水分同時移動方程式の検討と その解析^{70, 72)}

7-1 はじめに

建築において内外温度変動にともない生じる結露に対して、十分な断熱と防湿層の設置により完全に結露を防ぐ方法はあまりに安全側に過ぎ、時には非現実的な処理方法になる場合もある。現象の非定常性を考慮し、結露障害防止の観点に立つならば、より現実的で十分な対策が為されるであろう。

第 5 章において、結露および蒸発過程における材料内水分蓄積の挙動を種々の条件のもとで実験することにより明らかにした。すなわち、吸湿量、吸湿速度および含水率分布の時間経過を測定しその特性を把握した。また、結露過程と蒸発過程の差異を明らかにした。

しかしながら、先に述べたごとく現象の非定常性を理論的に把握し、任意の条件下での水分蓄積の状況を知ることは、結露障害防止の立場から基本的に必要なことである。そこで本章では、第 5 章の実験結果に基づき、第 3 章で述べた熱水分同時移動方程式が結露過程を十分予測し得るかどうかを検討する。さらに、材料内熱水分移動機構を理論的に解析する。

また、基礎式に現われる移動係数および材料の物性値が結果にどのように影響するのか、すなわち、用いた移動係数の決定法が基礎式を検討する上で十分であったかどうか、またどの係数の決定に十分な注意を払うべきなのかを調べる。

7-2 解析に用いる熱水分同時移動方程式

解析に用いた基礎式は、第 3 章 3-5 に述べたごとく、変形の無い、Bulk flow の生じない場合で、材料内の水蒸気移動と液水移動とが二相流モデルに従うとしたものである。さらに、材料内での局所平衡が成立しているとする。このとき、水分移動と熱移動の基礎微分方程式は(3-127)～(3-132)で表現される。すなわち、

水分移動に対して

$$\left(1 + a r_g \frac{\partial g}{\partial \theta}\right) \frac{\partial \theta}{\partial t} + \left(a r_g \frac{\partial g}{\partial T}\right) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (D_\theta \nabla \theta) + \nabla \cdot (D_T \nabla T) \quad (7-1)$$

$$D_{\theta} = D_{\theta v} + D_{\theta \ell} = k_v \frac{\partial g}{\partial \theta} + D_{\theta \ell} \quad (7-2)$$

$$D_T = D_{Tv} + D_{T\ell} = k_v \frac{\partial g}{\partial T} + D_{T\ell} \quad (7-3)$$

熱移動に対して

$$\begin{aligned} & \left(Cr + La r_g \frac{\partial g}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial t} + \left(La r_g \frac{\partial g}{\partial \theta} \right) \frac{\partial \theta}{\partial t} \\ & = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + L \nabla \cdot (D_{\theta v} \nabla \theta + D_{Tv} \nabla T) \end{aligned} \quad (7-4)$$

境界条件は

$$[-D_{\theta} \nabla \theta - D_T \nabla T]_B = \alpha' (X_r - X_B) \quad (7-5)$$

$$[-\lambda \nabla T]_B = \alpha (T_r - T_B) - L [D_{\theta \ell} \nabla \theta + D_{T\ell} \nabla T] \quad (7-6)$$

また、材料の平衡含水率関係は

$$X = g(\theta, T) \quad (7-7)$$

が存在している。

7-3 計算の条件と数値計算の方法

計算に用いた条件は、結露過程の実験 A, B, C に対応する条件である。表 7-1 に、各実験に対応する設定条件を示す。

表 7-1 計算に用いた条件

なお、結露実験において、含水率分布の測定は経過時間を変えて同一条件のもとで行なった。しかし、第 5 章表 5-1 に見られるように各実験とも多少の温度差がある。そこで、計算に用いた条件は同一実験に対して各実験の平均値を用いている。また、

設定 条件	槽内 温度	槽内湿度		上表面	下表面
		RH%	絶対湿度	温 度	温 度
A	18.7	54.4	7.46	16.5	5.2
B	20.5	75.5	11.54	18.7	9.6
C	28.5	47.9	11.98	22.8	5.2

基礎式の検討に対して熱伝導率の含水率変化の影響を少なくするため、計算は材料両表面温を与えて行なった。この表面温のうち高温側の表面温は時間とともにかなり変化する。この変化も同様に平均値を用いた。

数値計算は有限差分法の Crank-Nicholson の方法で行なった。(7-1), (7-4) は水分移動係数、熱伝導率が含水率により大きく変動し、したがって非線形系である。また、これらの

方程式の差分化は常に安定ではない。したがって、時間分割を十分小さくした場合も解が一致することを確認して以下の分割で計算を行なった。係数変化に対しては次の陽化法により線型化して計算した。

$$\nabla(\lambda \nabla Y) \doteq \frac{1}{2 \Delta x} \left[\left(\frac{\lambda_{m-1}^n + \lambda_m^n}{2} \cdot \frac{Y_{m-1}^n - Y_m^n}{\Delta x} - \frac{\lambda_m^n + \lambda_{m+1}^n}{2} \cdot \frac{Y_m^n - Y_{m+1}^n}{\Delta x} \right) + \left(\frac{\lambda_{m-1}^n + \lambda_m^n}{2} \cdot \frac{Y_{m-1}^{n+1} - Y_m^{n+1}}{\Delta x} - \frac{\lambda_m^n + \lambda_{m+1}^n}{2} \cdot \frac{Y_m^{n+1} - Y_{m+1}^{n+1}}{\Delta x} \right) \right] \quad (7-8)$$

$$C \frac{\partial Y}{\partial t} = C_m^n \frac{Y_m^{n+1} - Y_m^n}{\Delta t} \quad (7-9)$$

ただし、 Δx , Δt は位置座標および時間の増分、添字 m は節点番号であり、 n は時刻の番号である。

以下の計算においては、座標分割は8 ($\Delta x = 1 \text{ mm}$)、時間分割は5/1000 (h) とした。

7-4 計算に用いた材料の移動係数と物性値

計算対象となる材料は8mm厚の軟質繊維板である。

含水率勾配による水分伝導率 D_θ は6-2で測定し検討を加えた結果を使用する。すなわち、 $0 \leq \theta \leq 45$ (重量%) においては材料内水分移動は全て水蒸気で、 $\theta \geq 80$ (重量%) においては全て液水で移動していると考えられる。 $45 < \theta' < 80$ の範囲では、液と水蒸気の移動が共存する範囲であり、この間のそれぞれに対する値は内挿することにより得た。含水率勾配による水分伝導率は水蒸気成分 $D_{\theta v}$ と液水成分 $D_{\theta \ell}$ より

$$D_\theta = D_{\theta v} + D_{\theta \ell} \quad (7-10)$$

として計算に用いている。 $D_{\theta v}$, $D_{\theta \ell}$ の20℃における函数近似は次の通りである。

$$\begin{aligned} D_\theta &= 10^{\{(\theta' - a_1) (-a_2 \theta'^2 + a_3 \theta' + a_4) - a_5 \}} - a_6 \exp [-a_7 (\theta' - a_8)^2] \quad \theta' \leq 42 \\ &= a_9 10^{(a_{10} + \frac{a_{11}}{\theta' - a_{12}})} \quad \theta' > 42 \end{aligned} \quad (7-11)$$

$$\begin{aligned} D_{\theta \ell} &= b_1 \exp [-b_2 (\theta' - b_3)^2] + b_4 \exp [-b_5 (\theta' - b_6)^2] \quad \theta' \leq 50 \\ &= -b_7 \theta'^3 + b_8 \theta'^2 - b_9 \theta' + b_{10} + b_{11} \exp [-b_{12} (\theta' - b_{13})^2] \\ &\quad + b_{14} \exp [-b_{15} (\theta' - b_{16})^2] - b_{17} \exp [-b_{18} (\theta' - b_{19})^2] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -b_{20} \exp [-b_{21} (\theta' - b_{22})^2] & 50 < \theta < 155 \\
 & = b_{23} & \theta \geq 155
 \end{aligned}
 \tag{7-12}$$

ここで、 θ' は重量%の含水率である。上式の係数値を表 7-2 に示す。

表 7-2 $D_{\theta v}$, $D_{\theta \ell}$ の函数近似係数値

係数	係 数 値	係数	係 数 値	係数	係 数 値	係数	係 数 値
a_1	50.00	a_{11}	-3.24211×10	b_6	52.50	b_{15}	0.049625
a_2	0.686×10^{-6}	a_{12}	3.070025	b_7	0.09327×10^{-10}	b_{16}	52.50
a_3	3.806×10^{-5}	a_{13}	-9.28488×10^2	b_8	2.65843×10^{-9}	b_{17}	0.50×10^{-6}
a_4	52.89×10^{-5}			b_9	1.95885×10^{-7}	b_{18}	1.58568×10^{-3}
a_5	6.854	b_1	0.110×10^{-6}	b_{10}	4.31413×10^{-6}	b_{19}	$1.0 \times 10^{+2}$
a_6	0.110×10^{-6}	b_2	6.501×10^{-3}	b_{11}	0.110×10^{-6}	b_{20}	0.10×10^{-6}
a_7	6.501×10^{-3}	b_3	60.00	b_{12}	6.501×10^{-3}	b_{21}	7.15305×10^{-3}
a_8	65.00	b_4	0.030×10^{-6}	b_{13}	60.00	b_{22}	$1.55 \times 10^{+2}$
a_9	1×10^{-6}	b_5	0.049625	b_{14}	0.030×10^{-6}	b_{23}	0.201481×10^{-5}

図 7-1 に計算に用いた 20°C における D_θ , $D_{\theta v}$, $D_{\theta \ell}$ を示す。

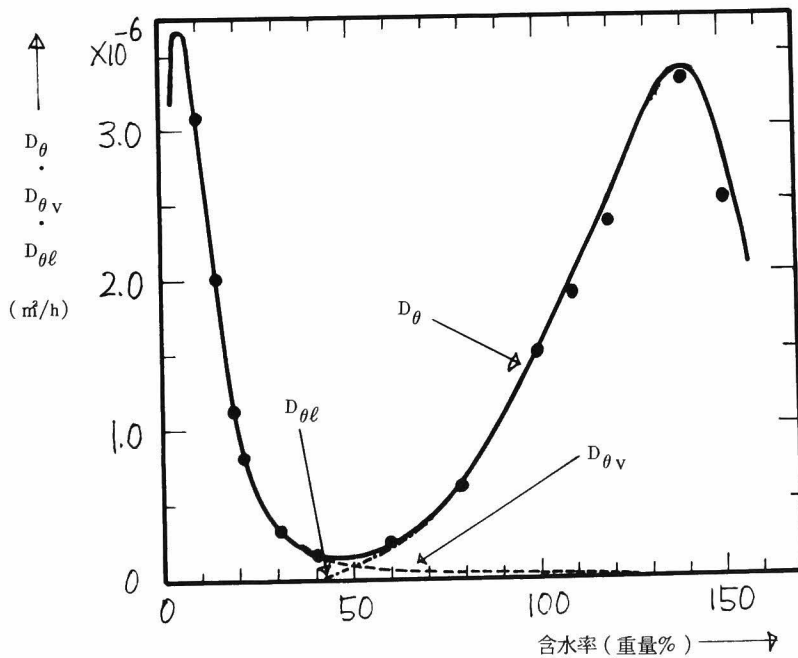


図 7-1 含水率勾配による水分伝導率 D_θ , $D_{\theta v}$, $D_{\theta \ell}$

D_θ の温度変化は同様に第 6 章で考察した。結果としての $D_{\theta v}$ と $D_{\theta \ell}$ の温度変化の函数近似を以下に示す。

$$D_{\theta v}(T) = D_{\theta v}(20) \cdot (0.725/400 \cdot T^2 + 0.275) \quad (7-13)$$

$$D_{\theta \ell}(T) = D_{\theta \ell}(20) \cdot (0.021 \cdot T + 0.58) \quad (7-14)$$

図 7-2 に、20℃を基準としたときの $D_{\theta v}$ 、 $D_{\theta \ell}$ の温度変化を示す。

温度勾配による水分伝導率 D_T は 6-3 で述べたごとく二通りの求め方がある。すなわち、材料に一定含水させた後材料を全面断湿し、温度差を与えた後の動的平衡状態から温度勾配と含水率勾配を求め、この比、すなわち温度勾配係数 ϵ と

D_θ と D_T を求める方法が第 1 の方法である。第 2 の方法は、片面断湿での内部結露実験の最終平衡時から同様に ϵ を求め D_T を決定する方法である。6-3 での結果は両者に大きな差が生じていた。本章では両者を用いて検討を行なうが、次の 7-5 では、妥当と思われる内部結露実験から求めた D_T を用い、7-6 で全面断湿から求めた D_T について検討を行なう。

内部結露から求めた温度勾配係数 ϵ の函数近似は次のごとくである

$$\epsilon = \sum_{i=1}^4 a_i \exp[-b_i(\theta' - c_i)^2] \quad (7-15)$$

ただし、 θ' は重量%の含水率である。表 7-3 にこの係数の値を、図 7-3 にこの ϵ を示す。

この ϵ と D_θ より D_T を求める。すなわち

$$D_T = \epsilon D_\theta \quad (7-16)$$

表 7-3 ϵ の函数近似係数值

係数	係数值	係数	係数值	係数	係数值
a_1	220	b_1	-0.953099×10^{-3}	c_1	60
a_2	60	b_2	-1.431008×10^{-3}	c_2	110
a_3	39	b_3	-2.295744×10^{-3}	c_3	140
a_4	70	b_4	-0.109861×10^{-1}	c_4	45

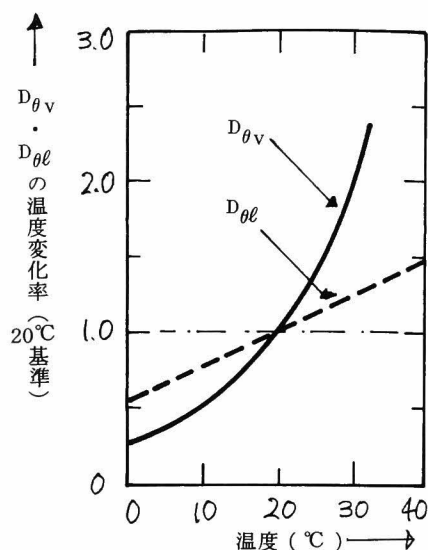


図 7-2 $D_{\theta v}$ 、 $D_{\theta \ell}$ の温度変化

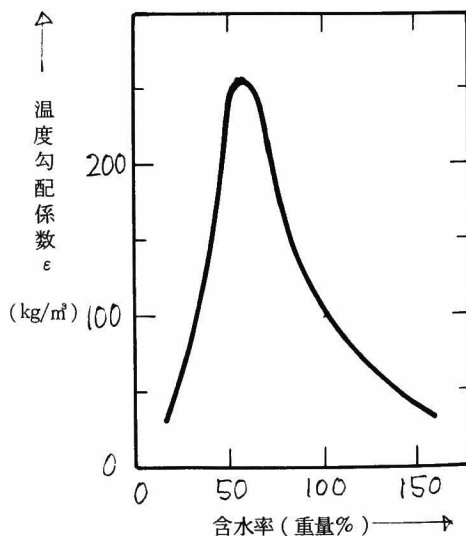


図 7-3 温度勾配係数 ϵ

ただし、この D_T は $\theta' \geq 45$ (重量%) における範囲での値に適用する。これは、 $\theta' < 45$ の範囲で水分移動はすべて水蒸気成分であることから次のように平衡含水率曲線と D_{θ_v} とより D_{Tv} が求まること、後節 7-6 で明らかになるように、この D_{Tv} は材料内水分移動に大きく影響するため正確な値が必要であるが、 ε のこの範囲の測定は僅かな含水率勾配の違いにより大きく変化することから上記のごとくした。

D_T の水蒸気成分と液水成分の分離は以下の方法で行なっている。

$$D_{Tv} = \frac{\frac{\partial g}{\partial T}}{\frac{\partial g}{\partial \theta}} D_{\theta_v} \quad (7-17)$$

また、 $D_{T\ell}$ は

$$D_{T\ell} = D_T - D_{Tv} \quad (7-18)$$

より求めた。図 7-4 に以上の D_T , D_{Tv} , $D_{T\ell}$ を示す。

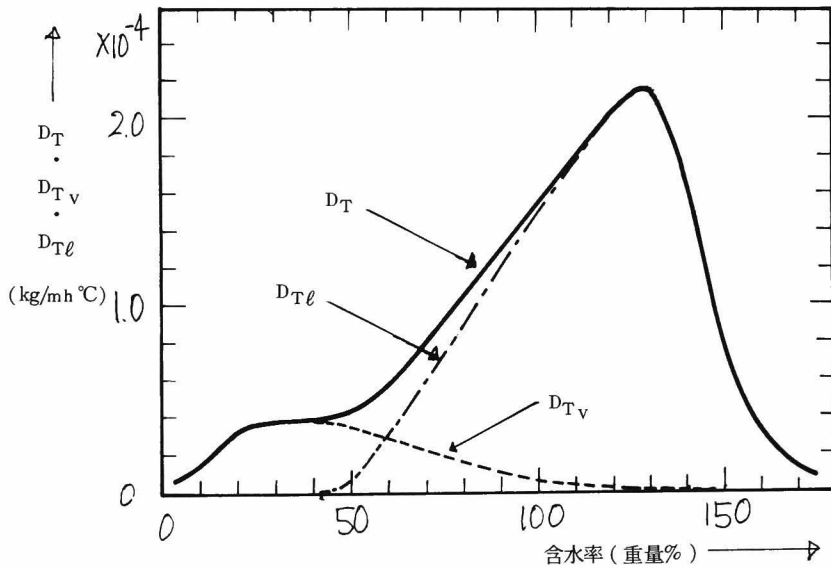


図 7-4 温度勾配による水分伝導率 D_T , D_{Tv} , $D_{T\ell}$

D_{Tv} を求めるに必要な平衡含水率曲線の函数近似は以下の如くである。

$$\begin{aligned} h &= e_1 + \frac{e_2}{(\theta' + e_3)} - 6.0 & \theta' \leq 9.0 \\ &= e_4 + \frac{e_5}{(\theta' + e_6)} - 6.0 & 9.0 < \theta' \leq 15.0 \\ &= 10 \left\{ e_7 + \frac{e_8}{(\theta' - e_9)} \right\} - 6.0 & 15.0 < \theta' \leq 50.0 \end{aligned}$$

$$h = 10^{\left\{e_{10} + \frac{e_{11}}{(\theta' - e_{12})}\right\}} - 6.0 \quad 50.0 < \theta' \quad (7-19)$$

ここで、 θ' は重量%の含水率である。この函数近似の係数値を表 7-4 に、この平衡含水率曲線を図 7-5 に示す。

材料の熱伝導率の含水率変化は 6-7 に述べた結果に従い次式によって近似する。

$$\lambda = 0.0612 + \frac{0.1288}{170.0} \cdot \theta' \quad (7-20)$$

ここで、 θ' は重量%の含水率である。

この熱伝導率の変化は二点の測定値からの内挿近似直線である。内挿の影響については 7-6 で述べる。

計算に用いた他の材料物性値および定数値をまとめて表 7-5 に示す。

表 7-5 計算に用いたその他の定数値

定 数	記号	定 数 値
比 熱	c	0.44 Kcal/kg $^{\circ}$ C
材 料 密 度	γ	240 kg/m 3
空 気 密 度	γ_g	1.205 kg/m 3
空 隙 率	a	0.65 m 3 /m 3
熱 伝 達 率	α	30 Kcal/m 2 h $^{\circ}$ C
湿気伝達率	α'	45 kg/m 2 h kg/kg

表 7-4 h の函数近似の係数値

係数	係 数 値	係数	係 数 値
e_1	0.115617×10^3	e_7	0.202836×10
e_2	-0.373000×10^3	e_8	-0.294754
e_3	0.193263×10	e_9	0.890479×10
e_4	0.136989×10^3	e_{10}	0.202613×10
e_5	-0.986641×10^3	e_{11}	-0.140087
e_6	0.878098×10	e_{12}	0.216690×10^2

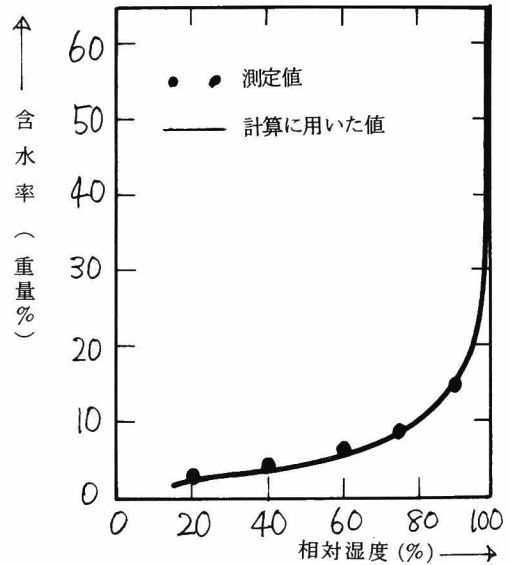


図 7-5 平衡含水率

7-5 結露過程における熱水分同時移動方程式の検討

ここでは、第 3 章、3-5 で示した解析に用いる熱水分同時移動方程式が結露過程を十分予測し得るかどうか、第 5 章で求めた結露過程の実験結果と比較することによって検討する。

図 7-6 に、条件 A, B, C の吸湿量変化の実験結果と対応する計算結果をまとめて示した。図 7-7, 7-8, 7-9 には、それぞれ条件 A, B, C の含水率分布の時間経過と対応する計算結果を示した。また、図 7-10 に、条件 B に対する材料内温度分布の実験結果 (B-7) と計算結果

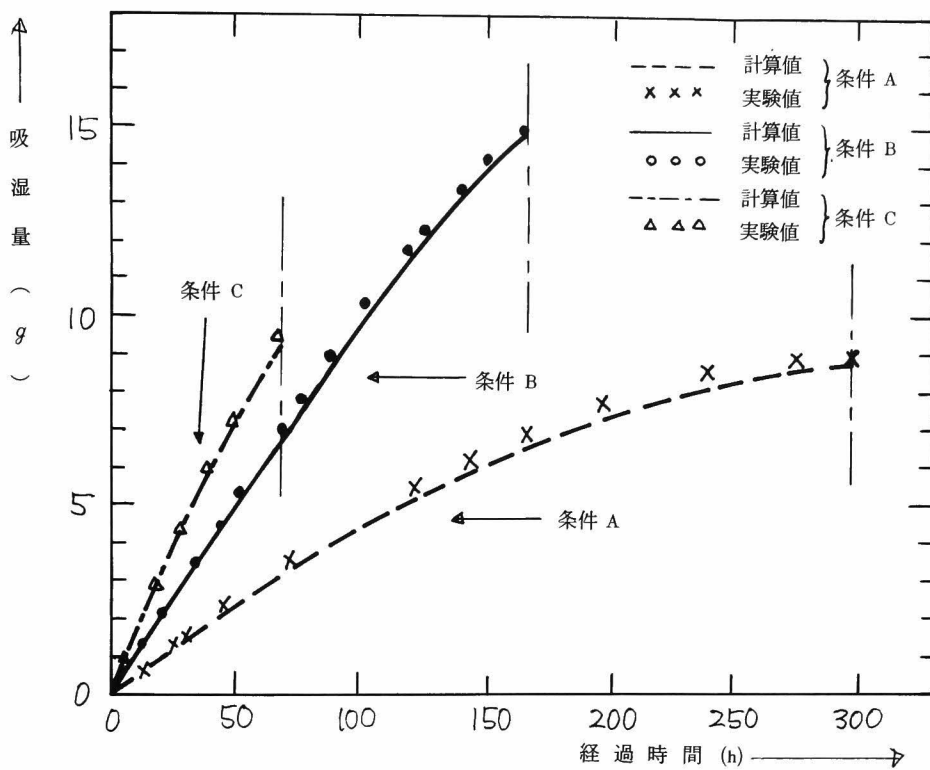


図7-6 吸湿量の実験値と計算値の比較

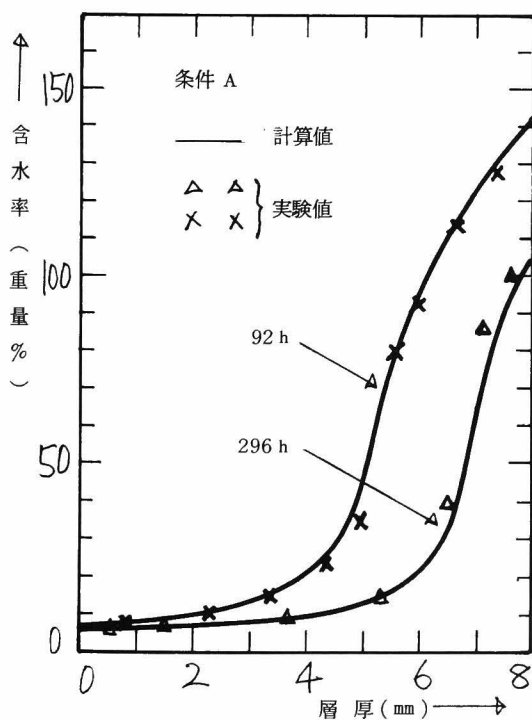


図7-7 含水率分布の実験と計算値の比較

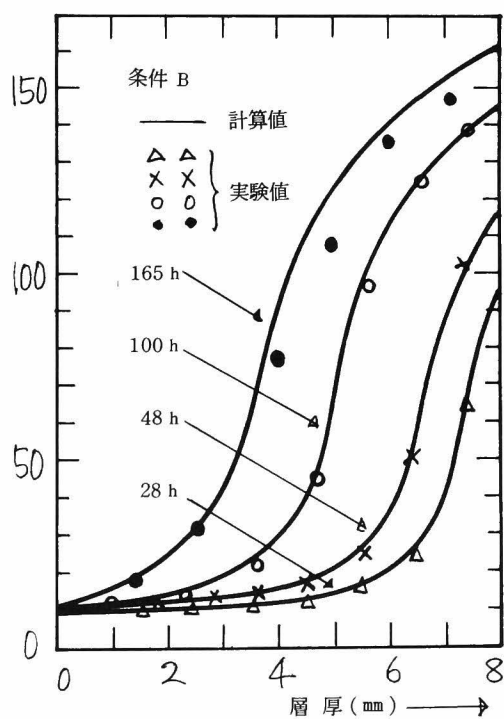


図7-8 含水率分布の実験値と計算値の比較

果を示した。

図 7-6 から、条件 A, B, C の吸湿量の時間変化は実験値と計算値とが非常に良く一致していることが分る。しかし、図 7-7~7-9 の含水率分布については実験値と計算値に一部不一致点が見られる。すなわち、条件 A について、実験ではほぼ最終平衡に達しているが、計算結果ではこの時刻でまだ最終平衡ではなく僅かに増加している。また、条件 B について、含水率分布の時間経過で、165 時間後の値は低含水率で良く一致しているが、高含水率部分で計算値の方が僅かに高くなっている。また、同様のことが条件 C についても言える。しかし、この程度の差は、含水率測定時の回収率が 100

% でないこと、水平分布に多少差があることから許容し得ると思われる。

以上のことから、条件 A, B, C に対して、吸湿量の時間変化、含水率分布形とその値の時間経過、両表面温を与えた計算結果ではあるが材料内温度分布の時間変化とも実験値と計算値は全体として非常に良く一致していると見なして良いだろう。すなわち、我々がここで用いた熱水分同時移動方程式は結露過程を十分精度良く予測し得るものであると言える。なお、ここで検討された結露過程の条件は、温度範囲が約 $5.0^{\circ}\text{C} \sim 29^{\circ}\text{C}$ の範囲について三種類の温度差をつけたものであり、これらの実験結果と理論値とが良く一致することから、用いられた熱水分同時移動方程式は氷点下の条件を除いて我々の遭遇するほとんどの範囲の結露過程を十分予測し得ると言えよう。

7-6 計算結果に及ぼす移動係数の影響

前節において、基礎式が結露過程を十分予測し得ることを述べた。基礎式の確立はそこに現われる移動係数の決定と深く関わっており、ここでは移動係数の結果に及ぼす影響を検討する。

第 1 に、第 6 章において決定した移動係数が基礎式を検討する上で十分であったかどうか、

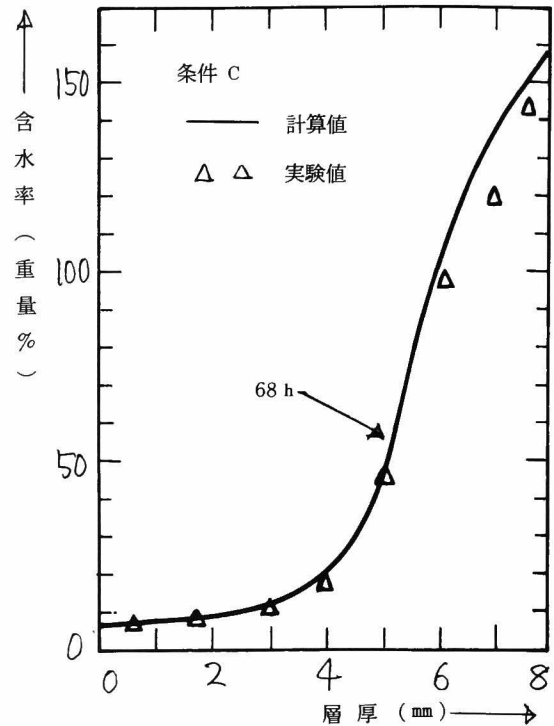


図 7-9 含水率分布の実験値と計算値の比較

すなわち、一部仮定および推定をして求めたものがあるが、この影響は無かったかどうかを検討する。第2に、すべての移動係数が同程度の精度を必要とするのかどうか、言いかえると、どの移動係数が結果に大きく効くのか、したがって、移動係数の決定に十分注意をするべき事項はどれかを明らかにする。

検討は前節における計算結果を基礎とし、考慮すべき移動係数のみを変化させた時、結果がどのように変化するかを見ることにより行なった。計算に使用する条件は実験Bに対応する条件Bである。検討の内容を表7-6にまとめて示し、検討内容をCase NOで与える。前節までの移動係数を用いた計算をCase 1とする。

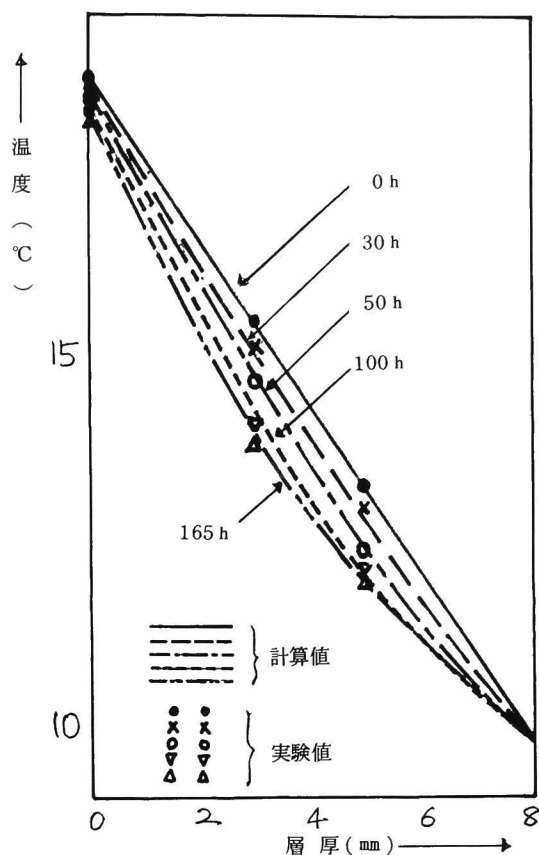


図7-10 材料内温度分布

表7-6 移動係数の影響の検討内容

Case No	D_{θ} の $D_{\theta v}$ $D_{\theta \ell}$ の分離	$D_{\theta v}$, $D_{\theta \ell}$ の温度変化	平衡含水率曲線	温度勾配係数	熱伝導率
1	$45 < \theta' < 80$ の範囲内挿	温度変化考慮	RH 92 % 以上内挿	内部結露実験より求めた ϵ	$\theta' = 6$, $\theta' = 170$ の測定値より直線近似
2	Case 1 の内挿曲線を変える	Case 1 と同じ	Case 1 と同じ	Case 1 と同じ	Case 1 と同じ
3	Case 1 と同じ	20 °C の $D_{\theta v}$, $D_{\theta \ell}$ で一定値	Case 1 と同じ	Case 1 と同じ	Case 1 と同じ
4	Case 1 と同じ	Case 1 と同じ	Case 1 の内挿曲線を変える	Case 1 と同じ	Case 1 と同じ
5	Case 1 と同じ	Case 1 と同じ	Case 1 と同じ	全面断湿実験 ($\theta' = 80$) より求めた ϵ	Case 1 と同じ
6	Case 1 と同じ	Case 1 と同じ	Case 1 と同じ	Case 1 と同じ	Case 1 と異なる曲線近似

7-6-1 水分伝導率の液および蒸気成分への分離の影響

(Case 2)

含水率勾配による水分伝導率 D_θ の蒸気、液成分の分離のうち、 $45 < \theta < 80$ (重量%) の範囲は両成分が共存しており、この範囲の分離は内挿により行なった。そこで、ここではこの内挿の仕方を変えて影響を検討する。

図7-11にここで用いた $D_{\theta v}$, $D_{\theta \ell}$ と Case 1 において用いた $D_{\theta v}$, $D_{\theta \ell}$ を示す。

図7-12に、含水率分布の計算結果を示す。また、図7-13に吸湿量の時間変化を示す。

図から分るように、内挿の仕方を変えても計算結果は Case 1 とほとんど差が見られない。したがって、 D_θ の分離のうち、共存する範囲は本研究で用いた内挿法で十分であることが知れる。ここで、 D_θ の分離の違いを述べたが、6-6ですでに述べたように、この分離の違いは D_T の分離の結果にも影響している。

7-6-2 水分伝導率の温度変化の影響 (Case 3)

水分伝導率 D_θ , D_T は温度によって変化する。また、その温度変化も液、蒸気成分によって異なる。ここでは、この温度変化の影響を調べるため、 20°C における値で一定値を取った時の結果への影響を調べた。

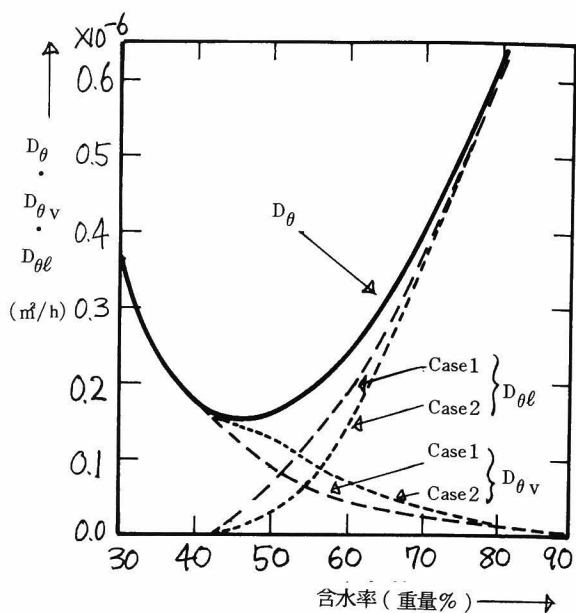


図7-11 D_θ の $D_{\theta v}$, $D_{\theta \ell}$ への分離の影響

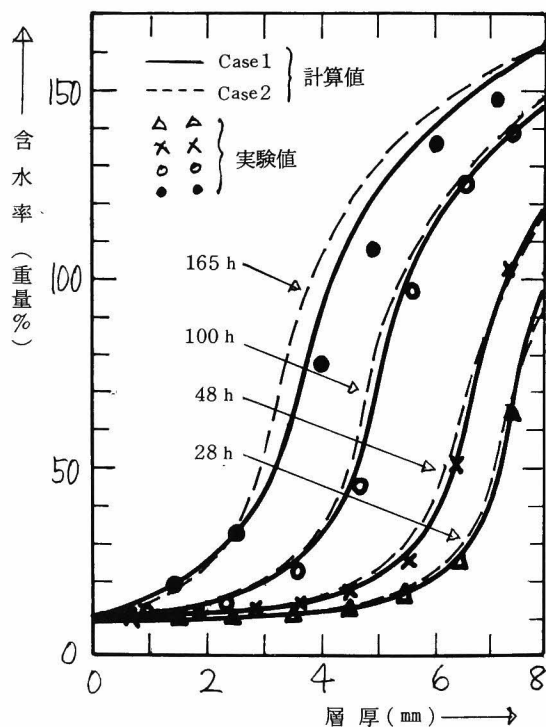


図7-12 D_θ の $D_{\theta v}$, $D_{\theta \ell}$ への分離の違いによる含水率分布への影響 (Case 2)

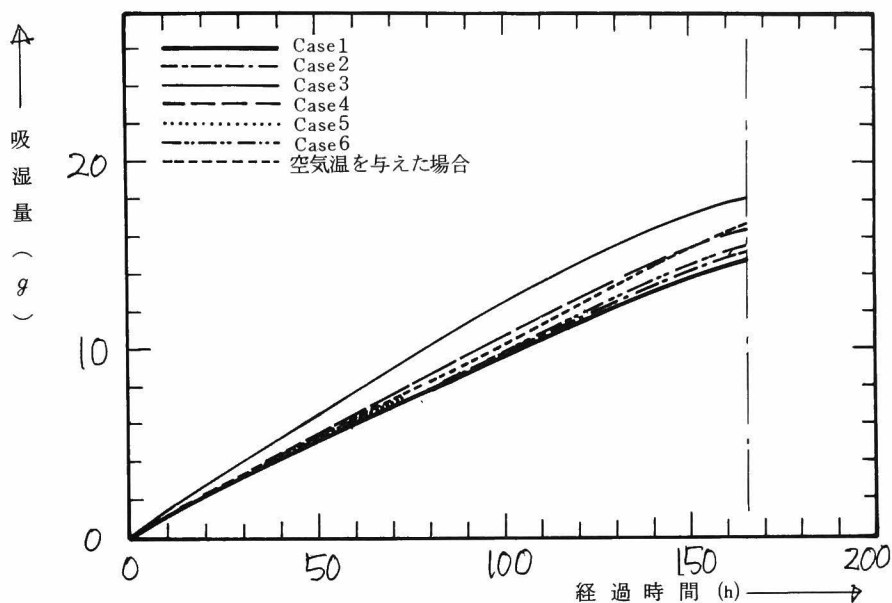


図 7-13 移動係数の吸湿量への影響

図 7-13 に、吸湿量の時間変化を、図 7-14 に含水率分布の時間経過を示した。

図から分るように、吸湿量、含水率分布とも Case 1 と比較して大きな差を生じている。すなわち、水分伝導率の温度変化は結果に大きく作用する。したがって、温度変化は考慮しなければならない。

7-6-3 平衡含水率曲線の影響 (Case 4)

材料の平衡含水率曲線は、 $D_{\theta V}$ から D_{TV} を求めるときに使用している。この理由はすでに述べたごとく、温度勾配係数 ε の低含水率の値の信頼度が小さいためである。 D_{TV} と $D_{\theta V}$ は次節 7-7 の結露過程の基礎式による解析によって明らかにされるように、材料内水分移動量に大き

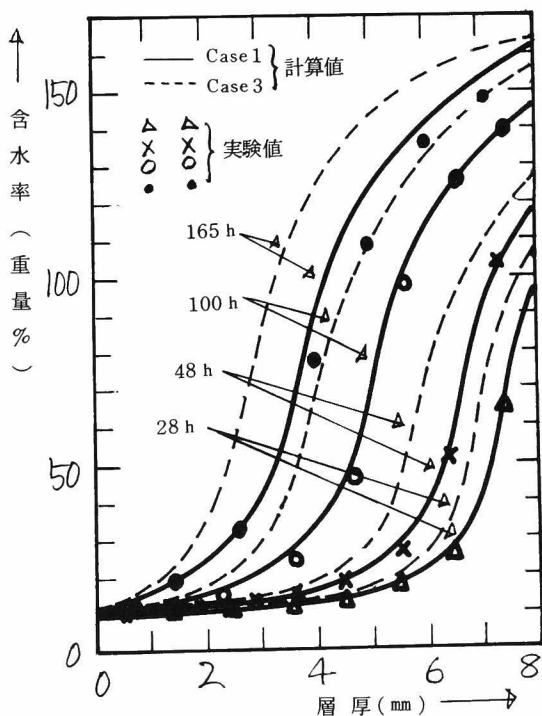


図 7-14 D_{θ} の温度変化による含水率分布への影響 (Case 3)

く影響する。したがって、平衡含水率曲線は重要な要素である。4-8で述べたように、RH 92%以上の高相対湿度においては測定中の微小な温度変化でも材料への結露が心配されるため測定に十分な注意を必要とする。我々はRH 92%までしか測定していない。このRH 92%に対応する含水率は約15重量%である。そこで、15%以上の含水率に対応する平衡含水率曲線は内挿によって求めている。一方、RH 92%までの範囲では、湿気伝導率 k_v が測定されている。この k_v と平衡含水率曲線により $D_{\theta v}$ の検定が為されているから、 D_{Tv} も対応する含水率15%までは信頼おける。また、温度勾配係数 ϵ により、含水率が45重量%以上の範囲において、ほぼ信頼できる D_T を求めることができるから、水蒸気成分のみの上限の含水率45重量%における D_{Tv} の上限も決ま

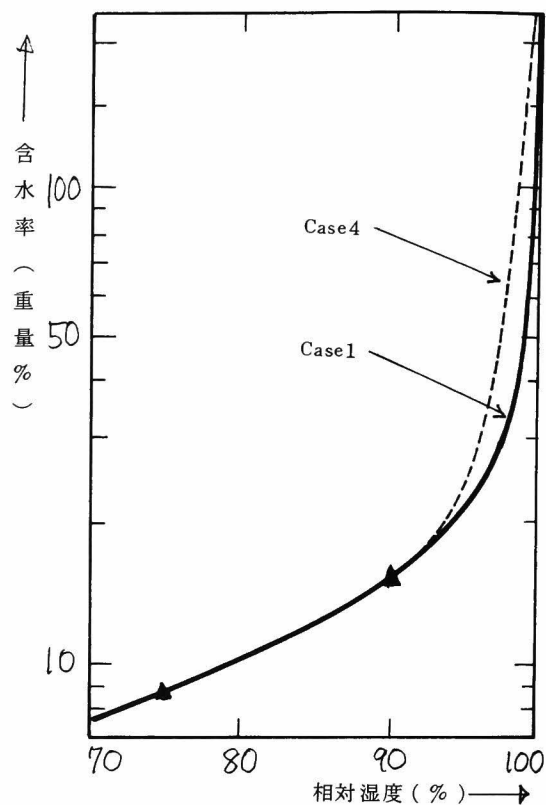


図7-15 平衡含水率の影響

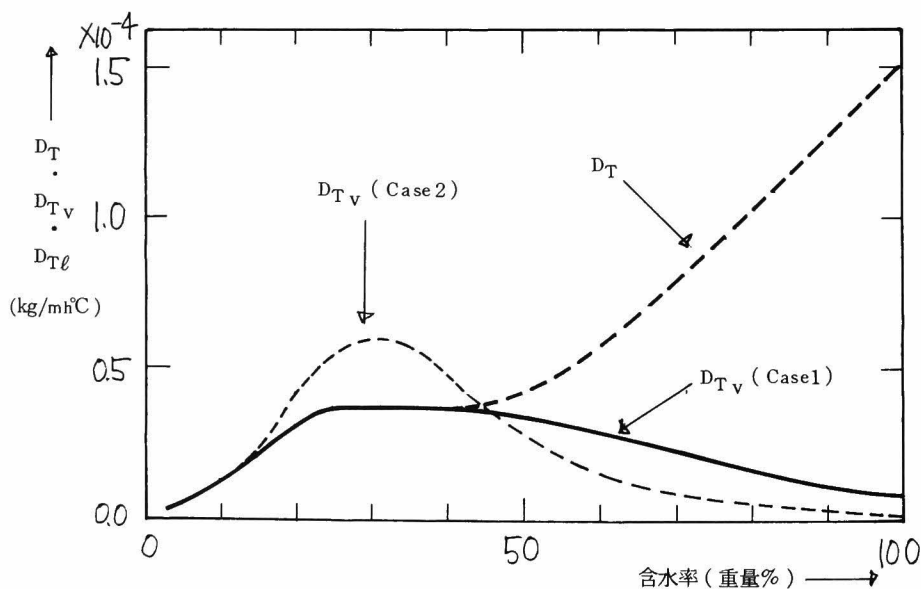


図7-16 平衡含水率曲線の違いによる D_{Tv} の変化

る。以上のことから、平衡含水率曲線の推定による不確かさは、 $15 < \theta' < 45$ 重量%の範囲である。そこで、ここでは上記の範囲の曲線を変えることによって結果がどのように変化するかを検討する。

ここで検討した平衡含水率曲線を図7-15に、それによる D_{TV} の変化を図7-16に示した。

計算結果のうち、吸湿量変化を図7-13に示し、含水率分布を図7-17に示している。図から分るように大巾な差ではないが、結果にかなりの差が生じている。RH 92%以上の平衡含水率曲線で少なくとももう1点(RH 90~95%の範囲で)測定しておく必要があると思われる。

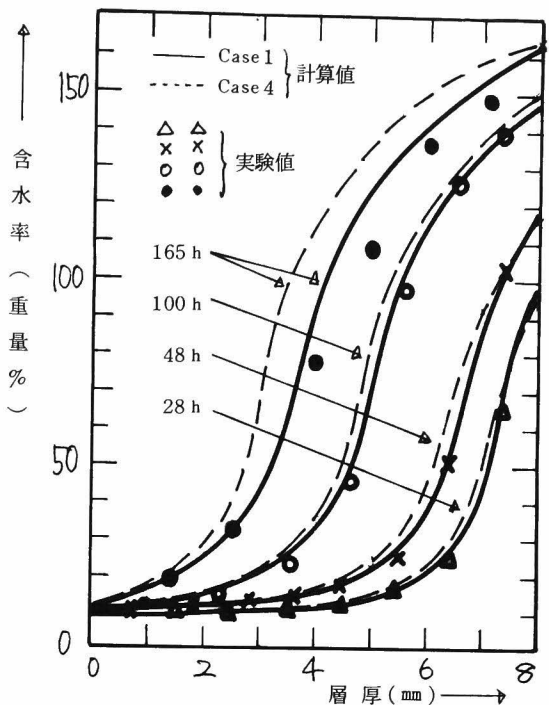


図7-17 平衡含水率曲線の違いによる含水率分布への影響 (Case 4)

7-6-4 温度勾配係数の影響 (Case 5)

含水率が45重量%以上に対する温度勾配による水分伝導率 D_T は温度勾配係数 ϵ の測定から求めている。

本計算 (Case 1) では内部結露の最終平衡状態より求めた ϵ によって D_T を決めて使用した。この最終平衡の含水率分布は第5章図5-14に見られるごとく水平分布も多少存在しており、また、分布の近似により値がばらつく。そこで、まず、この ϵ のばらつきによる結果への影響を調べた。このばらつきは図7-3に示した値の最大で約2割程度であった。計算結果は示していないが、こ

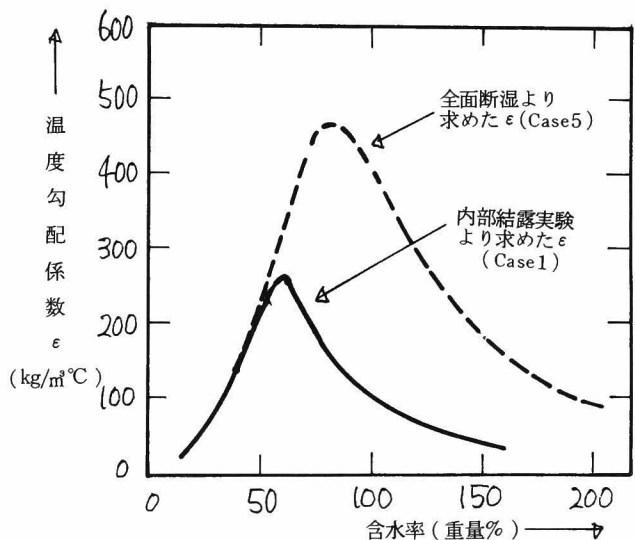


図7-18 温度勾配係数の影響

の程度のばらつきでは結果に大きな差を生じさせなかった。

一方、6-5で述べたごとく、温度勾配係数 ε の決定は二通りの方法で求められた。そこでは、全面断湿より求めた値は内部結露より求めた値と大きく異なっており、さらに平均含水率の違いによっても異なっていた。したがって、次に全面断湿によって得られた ε （平均含水率が80重量%）を用いて計算し、この ε によって結果がどのように影響するか検討する。

図7-18に全面断湿のものと内部結露による ε を再録しておく。

図7-13に吸湿量の時間変化を図7-19に含水率分布の時間変化を示す。図から

分るように、全面断湿の ε を使用すると、分布に大きな差が生じた。すでに ε の違いの原因について述べたが、結論として、吸湿過程における D_T の決定は、同じ吸湿過程である内部結露実験より ε を求めることにすればよいことが分る。

7-6-5 熱伝導率の影響 (Case 6)

すでに実験結果の考察において述べたごとく、実験初期の温度分布から時間経過とともに温度は減少してゆき、この温度変化が大きいことがわかっている。また、その結果、吸湿量、吸湿速度の変化に大きな影響を与えていた。したがって、理論の検討のためには、熱伝導率の含水率による変化を十分正確に測定しておかねばならない。しかし、6-7で述べたごとく、測定法は未だ十分に確立しているとは言えず精度良く測定し得ない状況である。

そこで、前節の基礎式の検討においては、熱伝導

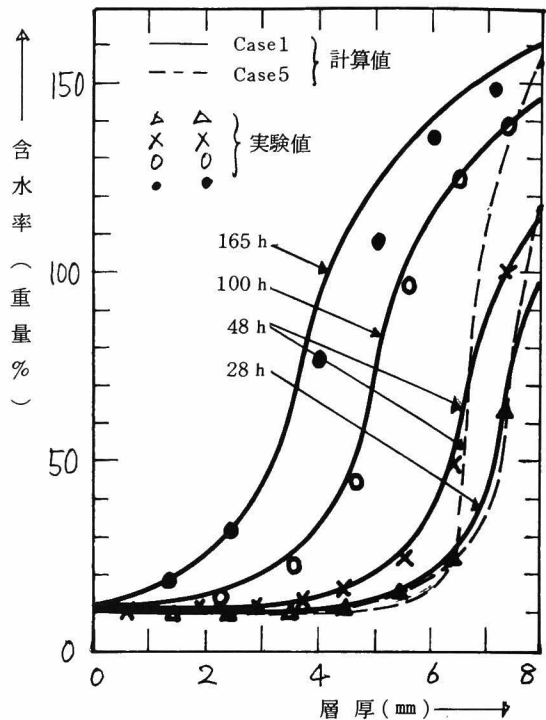


図7-19 温度勾配係数の違いによる含水率分布への影響 (Case 5)

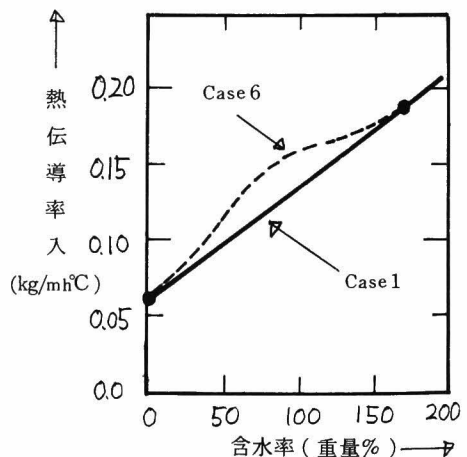


図7-20 熱伝導率の影響

率の影響が現われている実験結果の表面温を与えることにより、熱伝導率の不正確さの結果に及ぼす効果を少なくするようにした。

本計算 (Case 1) において用いた熱伝導率の値は、周期法によって求めた値であり、また、僅か2点の測定値から全体の含水率に対する値を推定している。ここでは、まずこの熱伝導率の与え方で結果に影響があるかどうか検討する。

図7-20に、ここで用いる熱伝導率の変化を示す。

図7-13に吸湿量の時間変化の、図7-21に含水率分布の時間変化の計算結果を示す。Case 1の場合と比較して結果はほとんど一致している。すなわち、基礎式の検討には熱伝導率の不正確さは影響していないと言える。

次に、熱伝導率の測定値の検討を行なう。今までの検討では実験結果の表面温を与えて行な

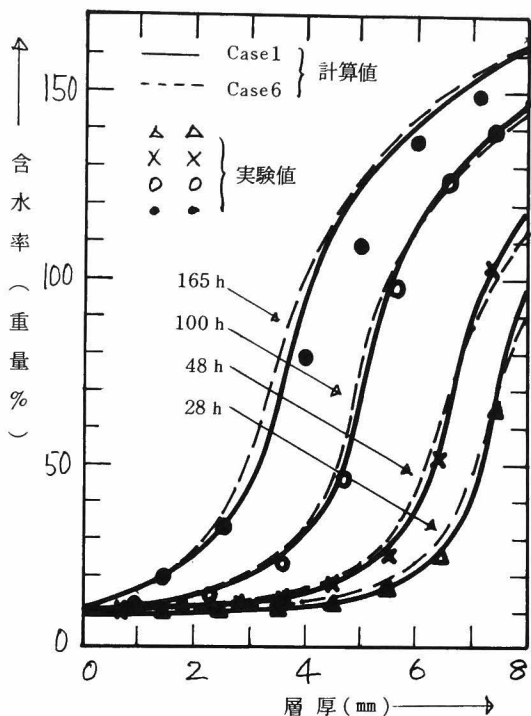


図7-21 熱伝導率の内挿の違いによる含水率分布への影響 (Case 6)

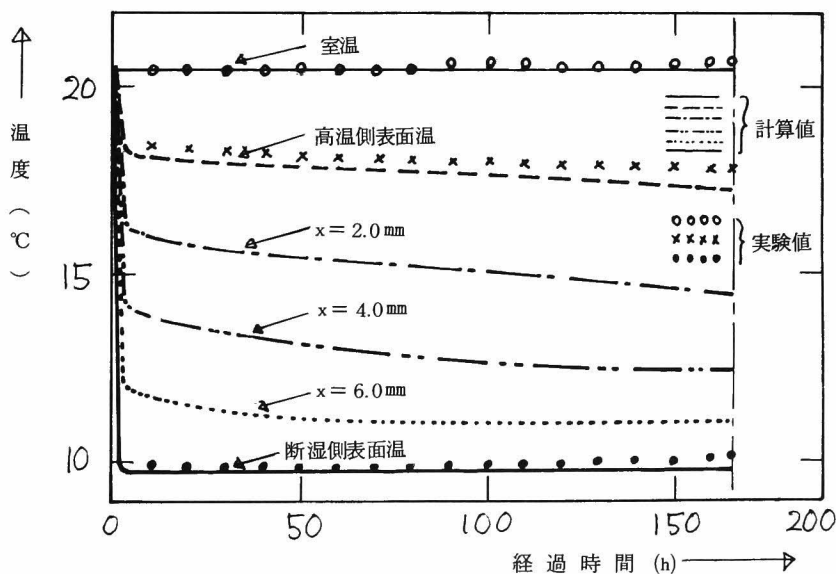


図7-22 空気温を与えた場合の温度変化の計算値と実験値の比較

った。ここでは、空気温と下面の表面温を与えて計算する。

計算結果の吸湿量を図 7-13 に、材料の温度変化を図 7-22 に、含水率分布を図 7-23 に示す。図 7-13, 7-23 から分るように、Case 1 と比較して時間経過とともに僅かに増大しているが、かなり良く一致していると言えよう。この差の原因は、図 7-22 に示している温度変化で時間経過とともに室内側表面温の減少が実験値より大きくなっていることにより、吸湿量が増加したためと思われる。すなわち、熱伝導率の測定値が過大であるか、あるいは、内挿直線近似値が過大となっているかによると思われる。今後、熱伝導率の測定について十分な検討をしてゆくつもりである。

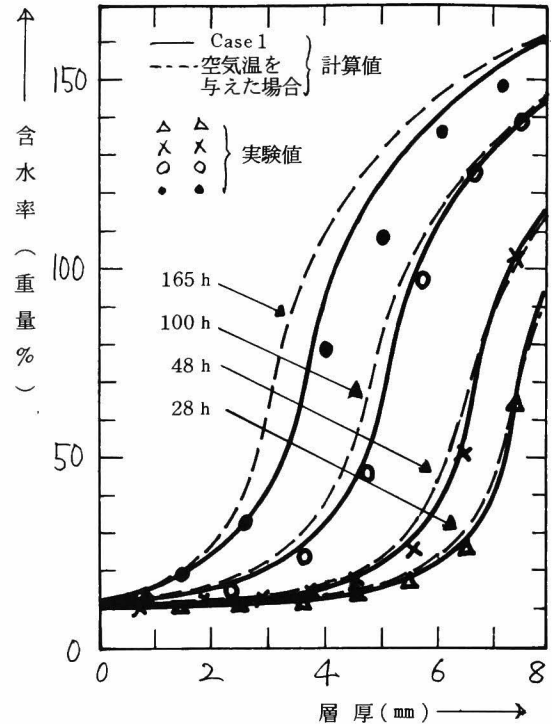


図 7-23 空気温を与えた場合の含水率分布の計算値と実験値の比較

7-7 熱水分同時移動方程式による結露過程の解析

前節までに、熱水分同時移動方程式の検討を行ない、結露過程を十分予測し得ることを明らかにした。また、移動係数値の妥当性および感度解析も行なった。

ここでは、熱水分同時移動方程式に基づき結露過程における材料内水分蓄積の挙動を解析する。検討する条件は、実験 B に対応する条件 B である。また、室内側空気温を与えた時の理論計算結果に基づき解析する。この理由は、前節 7-6-5 において検討したごとく、熱伝導率の含水率変化の値は多少高めの値ではあったが、結果としてほぼ妥当な値であったこと、条件 B の場合、最終平衡に至るまでの実験を行っていないことによる。条件 B を選んだのは、材料全体において含水率変化が大きく見られること、内部結露実験三種類の条件の中で平均的な挙動を示すと見られることによる。

まず、条件 B における基本的な量の計算結果を以下に示す。すなわち、図 7-24 に、吸湿量、吸湿速度の変化を、図 7-25 に含水率分布の時間変化を、図 7-26 に材料内温度分布の変化を

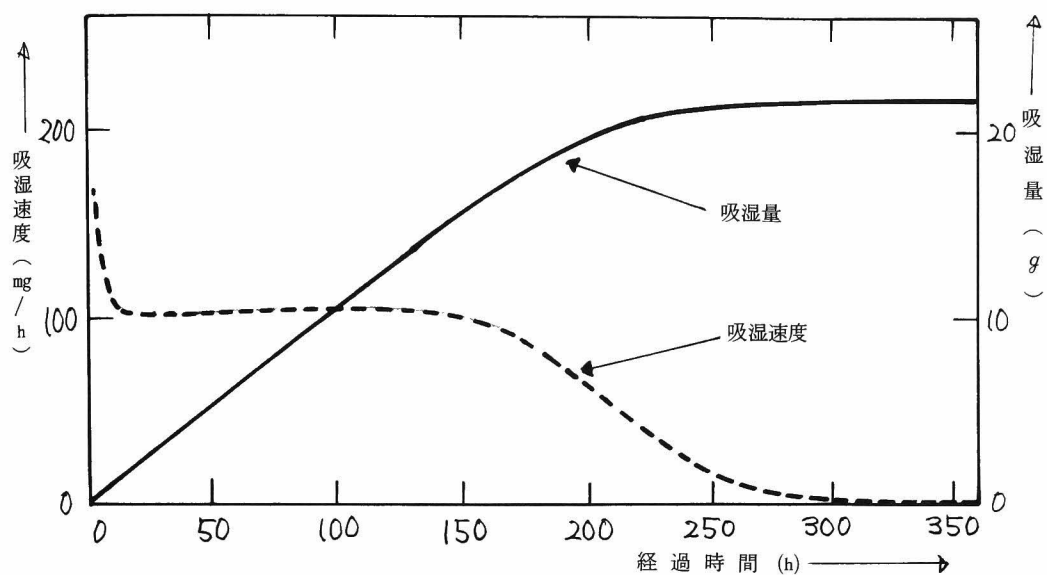


図 7-24 吸湿量，吸湿速度

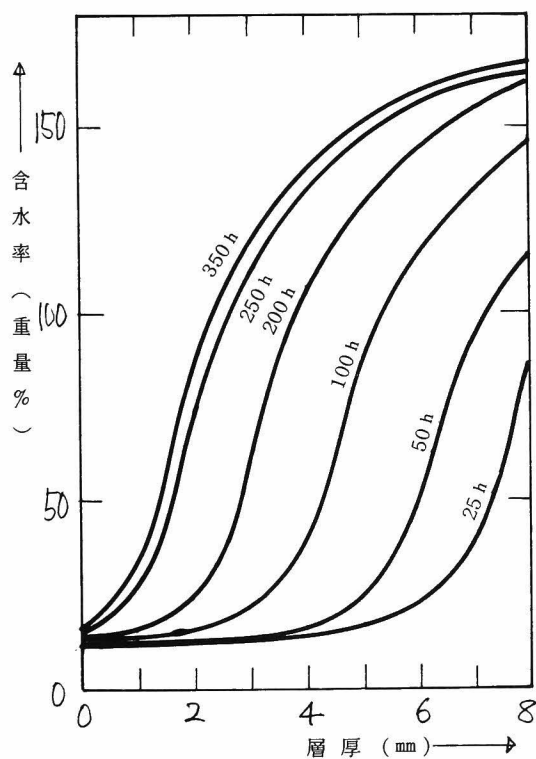


図 7-25 含水率分布

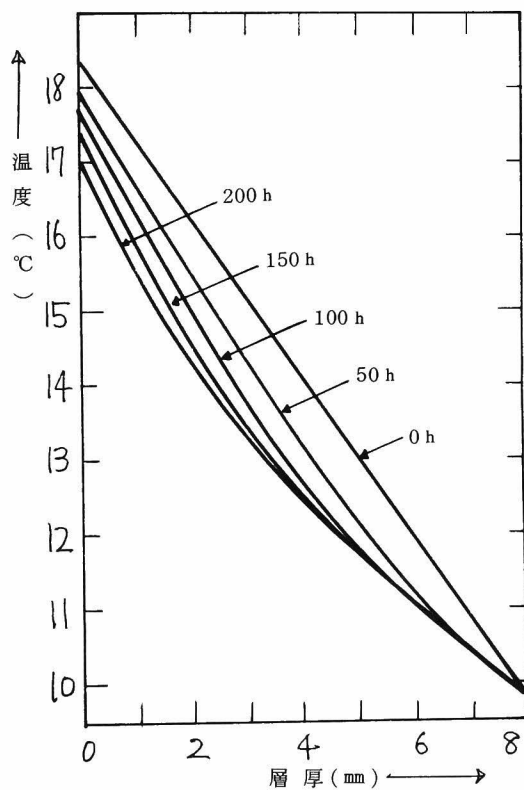


図 7-26 温度分布

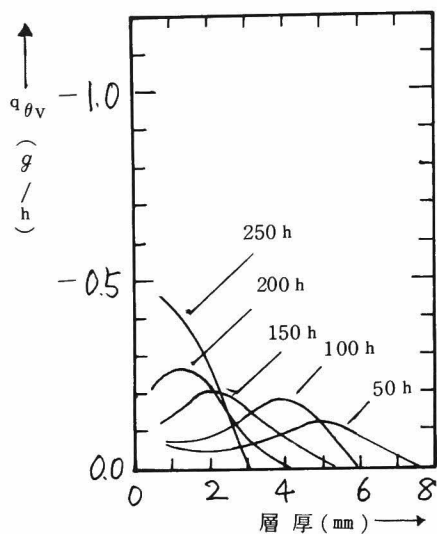


図 7-27 含水率勾配による水蒸気成分の材料内水分流

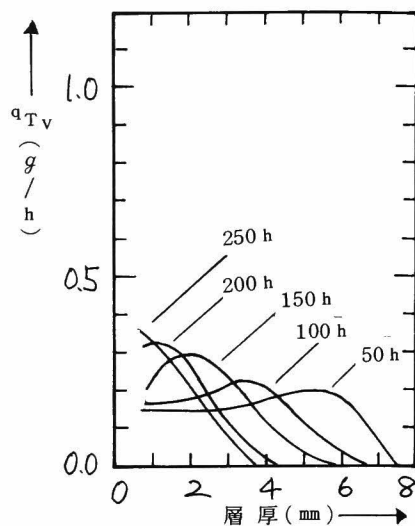


図 7-28 温度勾配による水蒸気成分の材料内水分流

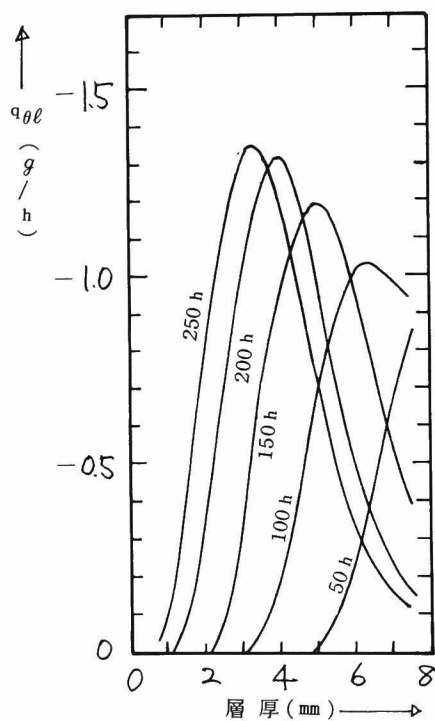


図 7-29 含水率勾配による液水成分の材料内水分流

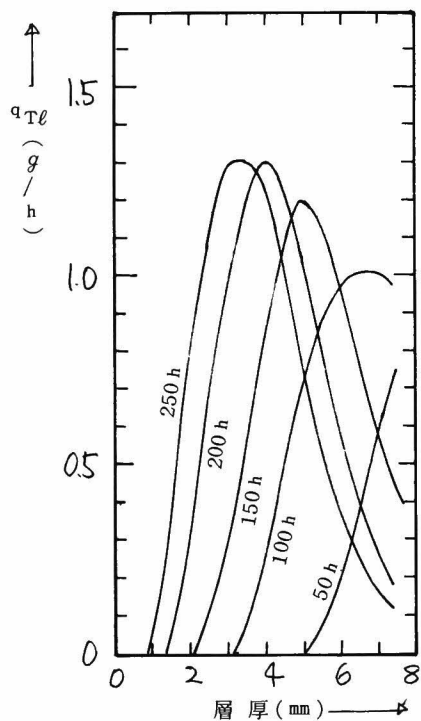


図 7-30 温度勾配による液水成分の材料内水分流

示した。以上の図の特性についてはすでに多く語っており省略する。

図 7-27～7-30 に材料内部における水分移動の成分，すなわち，含水率勾配による水蒸気移動量 $q_{\theta v}$ ，温度勾配による水蒸気移動量 q_{Tv} ，含水率勾配による液水移動量 $q_{\theta \ell}$ ，温度勾配による液水移動量 $q_{T\ell}$ の時間変化を示した。図から分るように，各成分のうち液水成分の移動量が水蒸気成分に比し非常に大きいことが注目される。

しかし，図 7-31 に示す材料内における全水分移動量 q_w の分布を見てみると，材料の室内側において高くほぼ一定の吸湿量を取り，内部に入って減少し断湿面で零となっている。室内側の高い水分移動量はほとんど水蒸気移動量であり， $q_{\theta v}$ ， q_{Tv} の差によって生じている。 $q_{\theta \ell}$ ， $q_{T\ell}$ の大きな移動量はほぼ相殺されることにより，断湿面側の水分移動量が零に近づくことが知れる。

以上のことから，材料内水分移動は水蒸気移動によって圧倒的に規定されることが分った。このような事実は，前節において検討したように， $D_{\theta v}$ ， D_{Tv} の移動係数が結果に大きく効くことと関連している。

時間変化を見るならば，0～150時間ほどは室内側の吸湿量がほぼ一定であり材料内部のみ変化している。それ以後は，吸湿量が材料全体において減少してゆき，最終的に零となる。室内側表面における吸湿量の変化が図 7-24 の吸湿速度の時間変化に対応している。

図 7-32 に材料内部の相対湿度分布の時間変化を，図 7-33 に材料内絶対湿度分布と飽和絶対湿度分布の時間変化を示す。図 7-32 から分るように，時間とともにほぼ RH 100 % に対応する領域が断湿面側から増加していることが知れる。第 8 章 8-4 で述べる近似計算法において，wet zone を定義しているがこの zone は上の領域に相当する。近似計算法に関連して述べるならば，この wet zone に対応する範囲内での移動量を先の図 7-31 で見ると，移動量は減少してゆくけれどもすべて零とはなっていない。このことは， V_{os} の近似計算法で実験とかなりの差を生じさせた理由になっている。すなわち， V_{os} は，この範囲で移動量が零と仮定している。我々の近似計算法では，これらの移動量を考慮する方法を考えた。

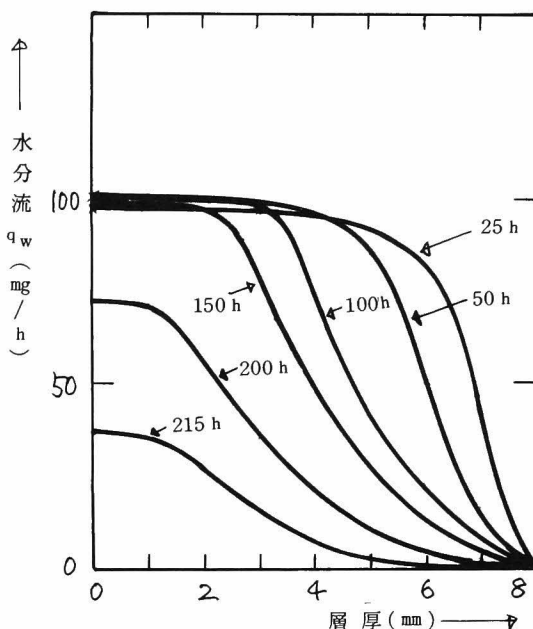


図 7-31 材料内水分流分布

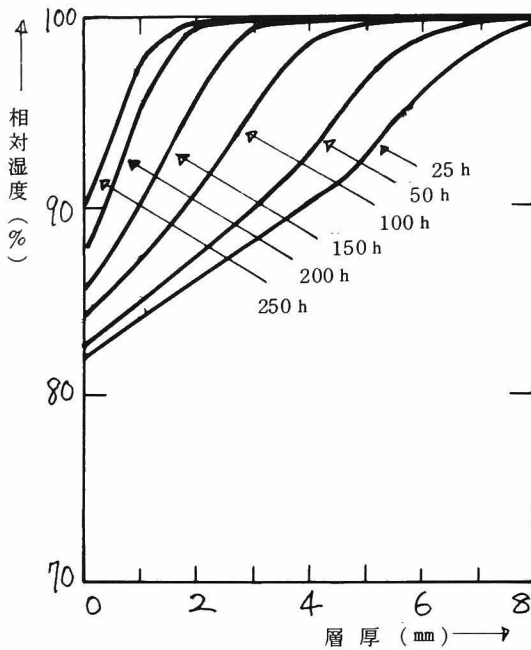


図 7-32 材料内相対湿度分布

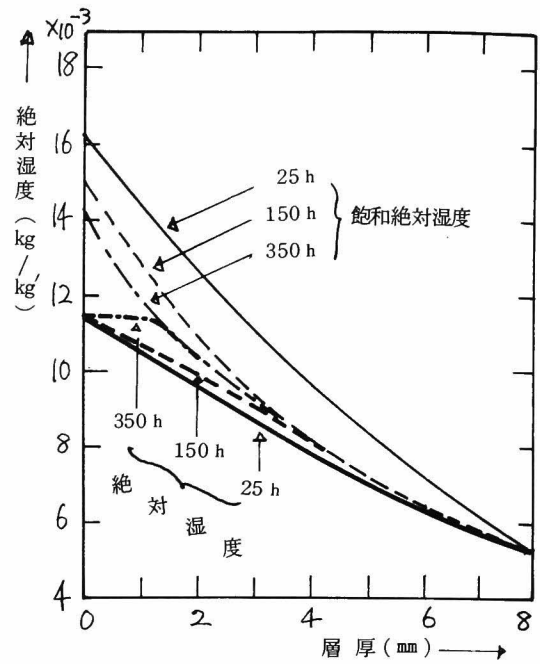


図 7-33 材料内飽和絶対湿度分布と絶対湿度分布

図 7-33 の絶対湿度分布を見てみると、室内側からはほぼ直線的に減少し、飽和絶対湿度の値に近づくとともに僅かに下に凸の形になり、断湿面まで飽和絶対湿度とほぼ一致する分布となっている。最終平衡状態においては、室内側からはほぼ露点位置まで一定の値をとっていることが明確に示されている。

7-8 第 7 章のまとめ

本章においては、熱水分同時移動方程式を結露過程の実験と比較することによって検討を行った。また移動係数の結果に及ぼす影響を調べた。最後に熱水分同時移動方程式によって結露過程における材料内水分蓄積の挙動を明らかにした。その結果を以下にまとめて示す。

1) 熱水分同時移動方程式の検討

第 3 章 3-5 で示した熱水分同時移動方程式による結果は、5～29℃の温度範囲における三種類の結露実験結果と良く一致することが分った。したがって、基礎式は氷点下を除く結露過程を十分な精度で予測し得ると言える。

2) 移動係数の影響

i) 含水率勾配による水分伝導率 D_θ において、液・蒸気成分の共存する範囲の分離は

内挿によった。この内挿による仕方の影響は小さい。

ii) 含水率勾配による水分伝導率 D_θ は温度によって大きく変化する。この変化の影響を見るために 20°C での $D_{\theta v}$, $D_{\theta \ell}$ の一定値を使用して計算したが、結果は実験と大きな差を生じさせる。すなわち、 D_θ の温度変化は重要で考慮しなければならない。

iii) D_{Tv} の値を求めるのに平衡含水率曲線を使用している。平衡含水率は RH 95%以上の値を求めるのが相当困難である。本研究において RH 92%までしか求めていない。これ以上の範囲については、内挿することによって求めている。この内挿曲線による違いは相当ある。したがって、測定に困難があるにしても少なくとも RH 95%での値を求める必要がある。

iv) D_T を求めるために温度勾配係数 ϵ を測定した。この温度勾配係数は全面断湿から求める方法と内部結露実験から求める方法の二通りで求めた。結果、両者の比は数倍のオーダーであった。基礎式の検討には内部結露より求めた ϵ による D_T を使用している。全面断湿より求めた ϵ により D_T を使用した場合、実験とは大きな差が生じていた。

v) 含水率による熱伝導率の変化は非常に大きい。基礎式に用いた熱伝導率は周期法によって乾燥時と 170 重量%の 2 点の値を求め、その他はこの 2 点を直線で内挿することによって得ている。熱伝導率の結果に及ぼす影響は大きいため、基礎式の検討には実験によって得られた両表面温を与えて行なっている。第 1 の検討は内挿曲線の影響であるが、この違いによる差は少なかった。第 2 は熱伝導率の測定値の検討である。このため、空気温を与えて検討を行った。この結果、実験値とは前半良く一致するが、後半は大きな差ではないが実験値より高い値を示した。測定結果は相当信頼できるとは言えるが、高めの値である。

3) 熱水分同時移動方程式による結露過程の解析

本研究で用いた熱水分同時移動方程式は結露過程を十分予測し得ることが分った。また移動係数も十分であると言える。ここでは、空気温および断湿側表面温を一定として与えた理論結果をもとに結露過程における材料内水分蓄積の挙動を明らかにした。

i) 材料内水分流の成分の時間変化を見ると水蒸気成分 $q_{\theta v}$, q_{Tv} に比し液水成分 $q_{\theta \ell}$, $q_{T\ell}$ は非常に大きい。

ii) 材料内水分流で見ると液水成分は相殺され、材料内水分蓄積に対して水蒸気成分が大きく効いている。

iii) 材料内相対湿度、絶対湿度の時間変化から、かなり明確に水蒸気移動の圧倒的な領域と液・蒸気成分の共存する範囲が現われている。

iv) 材料内絶対湿度の時間変化は材料内温度に応じる飽和絶対湿度の時間変化と対応させることにより吸湿速度はほぼ一定の期間の存在が明確に知れた。

第 8 章 近似計算法^{67, 74)}

8-1 はじめに

前章までに、結露問題を処理するために必要な熱水分同時移動の基礎式の検討を行い、この基礎式が十分な精度で結露過程を予測し得ることが明らかとなった。しかし、この基礎式は非線型であり、実用的な面で常に使用できるとは思えない。

簡単でしかも精度良く現象を把握できるような近似計算法を考察することは有意義であると思われる。ただし、種々の仮定、近似に対する精度、適用範囲の検討は十分しておくべきであろう。

ここでは、まず従来用いられてきた結露計算法を基礎式に基づき位置づけを行ない、その適用範囲および問題点を指摘する。後に、本研究の実験および理論を基礎に含水率分布の予測および結露蒸発過程の取り扱いが出来る近似計算法を述べる。

8-2 位置づけに用いられる基礎式

ここで用いられる熱水分同時移動の基礎式は、3-5で述べたごとく、固体実質部の変形がなく、Bulk flow もない場合で、材料内の水蒸気移動と液水移動とが二相流モデルとして生じるとしたものである。すなわち、(3-117)、(3-118)、(3-119)で

水蒸気移動の式は

$$ar_g \frac{\partial X}{\partial t} = \nabla \cdot (k_v \nabla X) + \alpha'_i S (X_i - X) \quad (8-1)$$

液水移動の式は

$$cr \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{\theta\ell} \nabla \theta) + \nabla \cdot (D_{T\ell} \nabla T) + \alpha'_i S (X - X_i) \quad (8-2)$$

熱の移動の式は

$$cr \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + L \alpha'_i S (X - X_i) \quad (8-3)$$

である。

8-3 従来用いられてきた結露計算法の熱水分同時移動方程式による位置づけとその問題点⁶⁶⁾

8-3-1 定常結露防止計算法

この方法は与えられた条件下で，材料が結露するかしないかを判定するために用いられる

すなわち，

1) 定常状態

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

2) 結露蒸発，吸放湿なし

$$\alpha'_i S (X - X_i) = 0$$

3) 液水移動なし

$$D_{\theta\ell} = D_{T\ell} = 0$$

4) λ , k_v は一定

の仮定をおくことにより，(8-1)～(8-3)は

$$\frac{\partial^2 X}{\partial x^2} = 0 \quad (8-4)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad (8-5)$$

となり，材料内の絶対湿度分布 $X(x)$ と温度分布 $T(x)$ が求められる。温度分布から飽和絶対湿度分布 $X_s(x)$ を求め， $X(x)$ と $X_s(x)$ を比較することにより

$$X_s(x) < X(x) \quad (8-6)$$

なる場所があるならば，結露が生じると判定される。

図8-1に，この方法による状態の模式図を示す。

この方法は，内外の温湿度が与えられた時，材料中において結露が発生するかどうかの検討に用いられるところに特徴がある。もしも，結露発生が見られるならば，断熱材，断湿材を適当に加えて材料中に結露が生じないようにする。すなわち，どんな与えられた条件のもとでも，

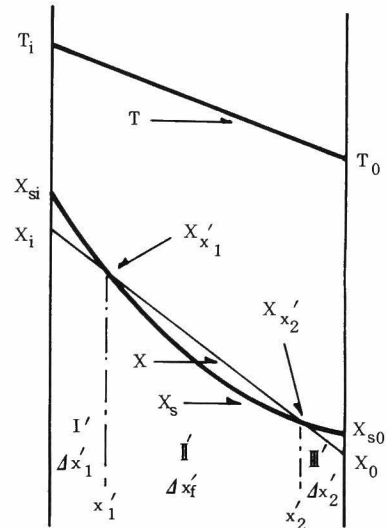


図8-1 定常結露防止計算法

結露が生じないようにするために用いられる方法である。したがって、実際に結露が生じた時の挙動は予測し得ない。

8-3-2 H. Glaser の方法^{8~11)}

定常結露防止計算法では、結露の有無の判定は行なえるが、結露が生じた場合にどれほどの量が結露するかわからない。H. Glaserは、熱と水蒸気移動について定常として、材料内の結露量を可能にする方法を提案した。

a) 考え方

Glaser は結露の生じる範囲を以下のごとく決定した。すなわち、図 8-2 に示すごとく結露の生じる範囲の境界 x_1 , x_2 において、流入水蒸気量 g_{in} と流出水蒸気量 g_{out} が

$$g_{in} = g_{out} \quad (8-7)$$

となるように決める。この理由として、もしも 8-3-1 で述べた方法による図 8-1 のごとき状態であるならば、材料内絶対湿度分布は、Ⅰ' の範囲では $X_i X_{x_1}'$, Ⅱ' の範囲では X_s 分布, Ⅲ' の範囲では $X_{x_2}' X_0$ となる。この時、結露範囲の境界 x_1' を見てみると、

$$g_{in} = k_v \frac{X_i - X_{x_1}'}{\Delta x_1'} \quad (8-8)$$

$$g_{out} = -k_v \left. \frac{\partial X_s}{\partial x} \right|_{x_1'} \quad (8-9)$$

図より明らかなように、両者の勾配を比較すると、

$$\left| \frac{X_i - X_{x_1}'}{\Delta x_1'} \right| < \left| \frac{\partial X_s}{\partial x} \right|_{x_1'} \quad (8-10)$$

したがって、

$$g_{in} < g_{out} \quad \left| \frac{\partial X_s}{\partial x} \right|_{x_1'} \quad (8-11)$$

となる。すなわち、境界 x_1' において蒸発が生じ

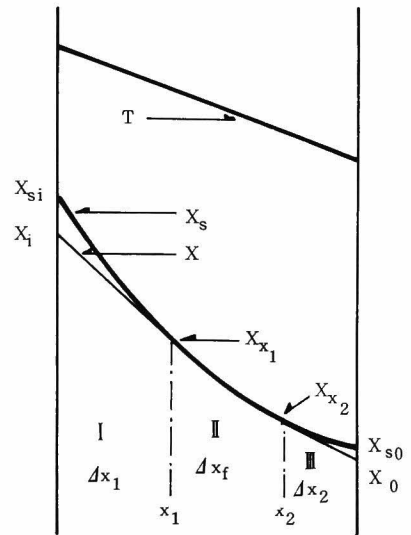


図 8-2 単層壁の場合

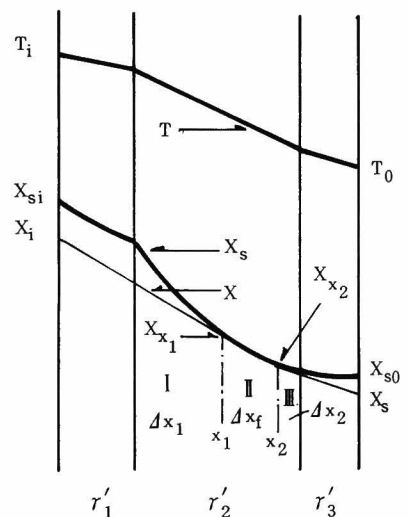


図 8-3 多層壁の場合

なければならない。したがって、 x_1' における絶対湿度は X_{sx_1}' よりも低くなる。また、図8-2の Δx_f よりも内部に境界が出来ると考えても同様なことが言える。結局、定常状態においては、

$$g_{in} = g_{out}$$

の位置が結露範囲の境界となる。

$g_{in} = g_{out}$ となるためには、結露範囲の境界を x_1, x_2 の位置において、

$$k_v \frac{X_i - X_{x_1}}{\Delta x_1} = -k_v \left. \frac{\partial X_s}{\partial x} \right|_{x_1} \quad (8-12)$$

$$-k_v \left. \frac{\partial X_s}{\partial x} \right|_{x_2} = k_v \frac{X_{x_2} - X_0}{\Delta x_2} \quad (8-13)$$

である必要がある。

結露範囲の境界は、後に述べる基礎式と上記の境界条件とによって求めることが出来る。しかし、凝縮熱を無視 ($L=0$) した場合には簡単に図式的に求め得る。すなわち、図8-2に示すごとく、与えられた境界値 X_i, X_0 より飽和絶対湿度分布に接線を引いた接点が x_1, x_2 となる。多層壁についても、図8-3のごとく横軸を湿気伝導抵抗にとることにより同様な方法で求めることができる。

b) Glaser の方法の基礎式による位置づけ

Glaser の方法の仮定は以下のごとくである。すなわち、

1) 熱と水蒸気移動定常

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

2) 結露の生じる範囲と生じない範囲とに分ける。

3) 結露の生じない範囲において吸放湿なし

$$\alpha_i' S (X - X_i) = 0$$

4) 液水移動なし

$$D_{T\ell} = D_{\theta\ell} = 0$$

5) λ, k_v は一定

6) 結露は結露の生じる範囲の全空隙を満たすまで可能

この仮定をもとに、Glaserの方法を基礎式に基づき整理すると、

結露の生じない範囲において

$$\frac{\partial^2 X}{\partial x^2} = 0 \quad (8-4)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad (8-5)$$

結露の生じる範囲において

$$k_v \frac{\partial^2 X_s}{\partial x^2} - \frac{\partial \theta}{\partial t} = 0 \quad (8-14)$$

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + L \frac{\partial \theta}{\partial t} = 0 \quad (8-15)$$

となる。また、結露範囲の境界 x_1, x_2 における境界条件は (8-12), (8-13) の他に

$$\lambda \frac{T_i - T_x}{\Delta x_1} = \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x_1} \quad (8-16)$$

$$- \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x_1} = \lambda \frac{T_{x_2} - T_0}{\Delta x_2} \quad (8-17)$$

が必要である。

c) 結露量の計算と結露時間の計算

Glaser は、結露範囲内での結露量と範囲内の空隙を満たす時間の計算法をも示した。

単位時間当りの結露量は、(8-14)より

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = k_v \frac{\partial^2 X_s}{\partial x^2} \quad (8-18)$$

で求められる。

$L = 0$ の場合、(8-15)は

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad (8-5)$$

となるから、定常温度分布より $T(x)$ が求まる。 $X_s = X_s(T)$ であるから $T(x)$ より $X_s(x)$ が求まる、したがって、簡単に (8-18) よりこの場合の各位置における結露量が計算できる。

$L \neq 0$ の場合、(8-14), (8-15)より

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + L k_v \frac{\partial^2 X_s}{\partial x^2} = 0 \quad (8-19)$$

また、 $X_s = X_s(T)$ であるから、(8-19)に代入して整理すると

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{L \frac{k_v d^2 X_s(T)}{\lambda dT^2}}{(1-L \frac{k_v dX_s(T)}{\lambda dT})} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) = 0 \quad (8-20)$$

となり、この式を解くことにより、各位置の温度分布したがって絶対湿度分布が求まる。

これから、(8-18)により各位置の結露量が計算できる。

結露範囲での単位時間当りの全結露量Gは

$$G = \int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial \theta}{\partial t} dx = \int_{x_1}^{x_2} k_v \frac{\partial^2 X_s}{\partial x^2} dx = k_v \left[\frac{\partial X_s}{\partial x} \Big|_{x_1} - \frac{\partial X_s}{\partial x} \Big|_{x_2} \right] \quad (8-21)$$

今、結露は材料の空隙を満たすまで起り得るとすると、結露範囲の全空隙体積Vは

$$V = a \Delta X_f$$

であるから、飽和に至る時間Zは

$$Z = \frac{r_w V}{G} = \frac{r_w a \Delta X_f}{k_v \left[\frac{\partial X_s}{\partial x} \Big|_{x_1} - \frac{\partial X_s}{\partial x} \Big|_{x_2} \right]} \quad (8-22)$$

で求められる。

b) 適用範囲と問題点

この方法は、与えられた内外温湿度のもとで、結露が生じた時の結露範囲と結露量および結露の生じる時間の予測ができることに特徴がある。

しかし、内部結露の場合、第5章、7章において解析したように、含水率の増加とともに液水移動が生じ、その結果結露状態にありながら実際の結露は止まり平衡に達する。この方法では、与えられた内外温湿度条件より、結露範囲が決定され、かつこの範囲は固定されるため、無限の結露が可能となっている。すなわち、液水移動の生じるような含水率に対しては予測は正確ではなく、また結露現象の特性が押えられていない。

具体的な例として図8-4に示す本研究で用いた片面断湿の場合について考えれば、この方

法では $(X_i - X_{s0})$ に比例した吸湿速度でいくらでも結露するが、実際は $X_i = X_d$ の状態に至って吸湿は止む。

Glaser は、計算法として無限の結露の可能性をもっているけれども、結露の止まる現象に対して結露範囲の空隙がすべて満たされる時間を計算することによって代用している。液水移動が無いという仮定のもとでの結果であるからこのようになるが、この仮定も上で述べたように、液水移動の影響は大きく、結露範囲を増大させ、その程度も条件により異なる。また、この時の含水率は空隙をすべて満たしはしない。

したがって、この計算法は含水率の少ない初期の状態の予測および結露蒸発の条件下で材料内に結露水が残留するかどうかの検討には用いられると思える。

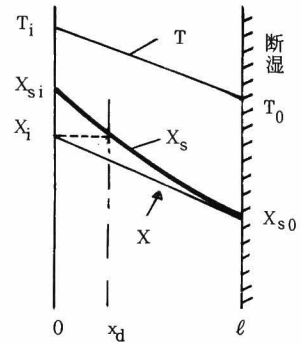


図 8-4 片面断湿の例

8-3-3 B.H.Vos の方法^{12), 13)}

Glaser の方法は与えられた条件のもとでの結露量の計算を行なう方法であった。しかしながら、この方法は結露した水分の液水移動を考慮していないため結露後の挙動が不明であった。B. H. Vos は液水移動を考慮することにより、より現実的な結露量の計算法を示した。ただし、この方法は冷却側を断湿した一様な材料についての議論である。

a) 考え方

材料内液水移動量 q_ℓ は

$$q_\ell = -D_{T\ell} \frac{\partial T}{\partial x} - D_{\theta\ell} \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (8-23)$$

ここで $-D_{T\ell} \partial T / \partial x$ は $-D_{\theta\ell} \partial \theta / \partial x$ に比して小さいとして無視出来るならば

$$q_\ell = -D_{\theta\ell} \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (8-24)$$

となる。

今、軽量コンクリートの $D_{\theta\ell}$ の変化を見てみると図 8-5 のような特徴をもっている。特に注目すべき点は、ある含水率 θ_c のところで $D_{\theta\ell}$ は急激に増

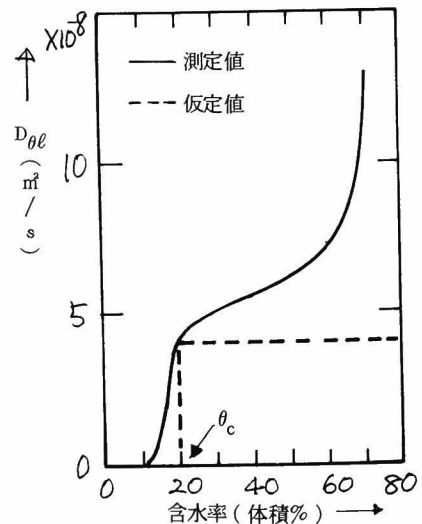


図 8-5 軽量コンクリートの $D_{\theta\ell}$ と仮定値

加していることである。このような $D_{\theta\ell}$ を持つ材料での含水率分布を見てみると図 8-6 のようになっているであろう。

このことから、次のような仮定をおく。

$$\theta < \theta_c \text{ のとき } D_{\theta\ell} = 0$$

$$\theta \geq \theta_c \text{ のとき } D_{\theta\ell} = D_c = \text{一定}$$

この仮定は、図 8-5、8-6 において点線で示した状態を考えていることに相当している。以後の議論において、材料内の含水率が θ_c 以上である範囲を wet zone, θ_c 以下の範囲を dry zone とし、 θ_c の値を取る位置を wet front と呼ぶ。

以下において、wet front の進行について述べる。最初、材料は乾燥しているとする。この初期の状態においては、図 8-7 に示すように、材料内では直線 $X_i X_{s0}$ にしたがった水蒸気移動のみが存在し、冷却側で凝縮が生じる。時間の経過とともに含水率の増加は冷却側から内部に進行してゆく。この時の状態を図 8-8 に示す。ここで、dry zone では水蒸気移動が、wet zone では液水移動と水蒸気移動が生じている。今、wet zone 内での液水移動と水蒸気移動とが相殺されているとし、また飽和絶対湿度分布による局所的な凝縮量は小さいとして無視する。この仮定より、dry zone から $X_i X_x$ の直線に従う水蒸気移動量が wet front において凝縮すると考えられる。したがって、この流入水蒸気量が wet front をさらに進行させると考えるならば、wet front の進行に対する次式が得られる。

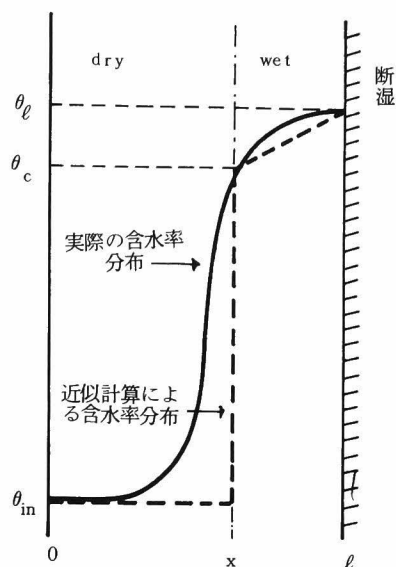


図 8-6 含水率分布

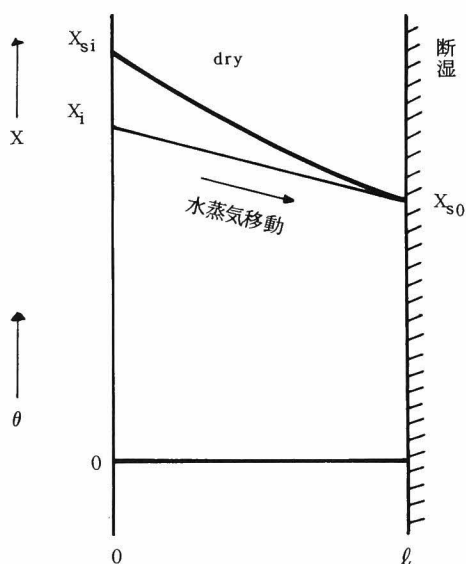


図 8-7 初期の状態

$$-\theta_c \frac{dx}{dt} = -k_v \left. \frac{\partial X}{\partial t} \right|_x = k_v \frac{X_i - X_s(x)}{x} \quad (8-25)$$

積分して

$$\frac{k_v}{\theta_c} t = - \int_{\ell}^x \frac{x}{X_i - X_s(x)} dx \quad (8-26)$$

定常温度分布より求めた $T(x)$ から $X_s(x)$ が得られるから、(8-25) より wet front の位置 x と時刻 t との関係が得られる。したがって、この関係が得られることにより材料内での結露量の時間変化が得られる。最終的には、図 8-9 に示すごとき状態に達する。この時 dry zone での水蒸気移動量は零となっている。

b) Vos の方法の基礎式による位置づけ

Vos の方法の仮定は以下のごとくである。すなわち、

- 1) 最初材料は乾燥している
- 2) 熱伝導は定常

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

- 3) λ, k_v は一定
- 4) $D_T \ell = 0$
- 5) 凝縮熱無視 $L = 0$
- 6) 水蒸気移動の支配的な領域 (dry zone) と水蒸気移動と液水移動の存在する領域 (wet zone) に分ける
- 7) dry zone においては吸放湿無視
- 8) wet zone においては水蒸気移動と液水移動とが相殺されている。

この仮定をもとに Vos の方法を基礎式に基づいて整理すると

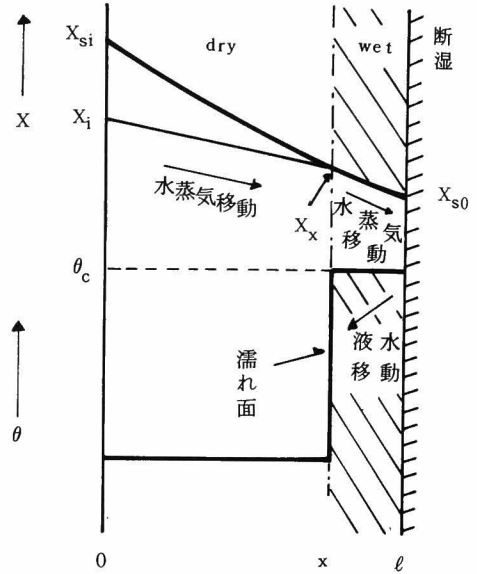


図 8-8 中間の状態

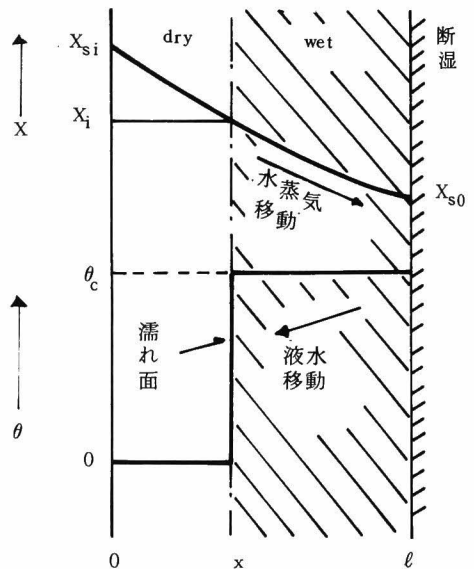


図 8-9 平衡の状態

dry zoneにおいて

$$\frac{\partial^2 X}{\partial x^2} = 0 \quad (8-4)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad (8-5)$$

wet zone において

$$k_v \frac{\partial^2 X_s}{\partial x^2} + \frac{\partial \theta}{\partial t} - D_{\theta \ell} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = 0 \quad (8-27)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad (8-28)$$

境界条件は

断湿面で

$$-k_v \left. \frac{\partial X_s}{\partial x} \right|_{\ell} - D_{\theta \ell} \left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_{\ell} = 0 \quad (8-29)$$

$$X_{s\ell} = X_{s\ell}(\Gamma) \quad (8-30)$$

wet front ($x = x$) で

$$X_x = X_{sx} = X_{sx}(\Gamma) \quad (8-31)$$

$$\theta_x = \theta_c \quad (8-32)$$

$$-\theta_c \frac{dx}{dt} = -k_v \left. \frac{\partial X}{\partial x} \right|_x + D_{\theta \ell} \left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_x + k_v \left. \frac{\partial X_s}{\partial x} \right|_x \quad (8-33)$$

室内側 ($x = 0$) で

$$X = X_i \quad (8-34)$$

初期条件は ($t = 0$)

$$\theta = 0 \quad (8-35)$$

ここで、(8-33)は wet front での水分蓄積がさらに wet front を進行させるという条件を表わしたものである。Vosはさらに、仮定8)を置くことによりwet front の進行について簡単に求めるようにした。すなわち、wet zone において、各位置での液水移動と水蒸気移動とが相殺されることから、

$$D_{\theta\ell} \frac{\partial \theta}{\partial x} + k_v \frac{\partial X_s}{\partial x} = 0 \quad (8-36)$$

よって、wet front においても

$$D_{\theta\ell} \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_x = -k_v \frac{\partial X_s}{\partial x} \Big|_x \quad (8-37)$$

が成立する。したがって、(8-33)は

$$-\theta_c \frac{dx}{dt} = -k_v \frac{\partial X}{\partial x} \Big|_x \quad (8-25)$$

となり、a) で述べた式が導ける。

c) 適用範囲と問題点

Vosの方法の主要点を列挙すると

- 1) 片面断湿の条件で結露は断湿面から生じること
- 2) 含水率勾配による液水移動の係数 $D_{\theta\ell}$ が限界含水率 θ_c において急激に増加する特性をもっていること。
- 3) 限界含水率 θ_c において見かけの相対湿度 100 % に対応していること
- 4) λ , k_v は一定であること
- 5) 温度勾配による液水移動が無視できること
- 6) wet zone 内において、液水移動と水蒸気移動とが相殺されることである。

この方法は、片面断湿という条件下ではあるけれども、液水移動を考慮することによって材料内への total な結露量の時間変化の予測、および最終的な平衡状態の達成にも可能になっている点で、結露現象についての近似計算法として優れていると思われる。

しかし、上述の主要点を考えてみると、大別してこの方法を適用させる時の条件 1), 2), 3) と複雑な熱水分同時移動を簡単な取扱いに導くための仮定 4), 5), 6) とに分けられ、前者においては材料特性について、後者において近似についての問題が指摘できよう。

まず材料特性に関して考察する。第 1 に、軽量コンクリートでは θ_c に相当する含水率が見つけれられるが、この特性は材料の空隙構造によるものであり、どんな材料についても決定できるとは言えない。例えば、本研究に用いた軟質繊維板の $D_{\theta\ell}$ を図 8-10 に示しているが、 θ_c の値を明確に決定し得ない。また、この方法での total 含水量は実際の wet zone 内における含水率分布の積分値であり、 θ_c はこの意味で言えば平均含水率に相当する。平均含水率は結露条件によって大きく変化するから、一意的に決定されるものではない。したがって、材料特性

としての θ_c を用いて total 含水率を任意の条件のもとで同程度の精度で予測することはできない。第 2 に、仮りに軟質繊維板について $\theta_c = 80 \sim 120$ (重量%) の範囲より決めたとしても、見かけの RH 100 % に対応する含水率 θ_{100} は 40 ~ 60 (重量%) の範囲内の値をとっており (第 7 章, 図 7-7), 相当離れている。この θ_{100} は最終平衡に達する時の露点位置における含水率であり, このような近似計算をする上で重要である。Vos の方法では, θ_c が露点位置にきた時に平衡に達するから, θ_{100} と θ_c とが異なっていると大きな誤差の要因となる。第 3 に, 片面断湿の条件下のみで適用される方法であり, 冷却側からの水分流がある場合には適用できない。また, 結露は常に断湿面側から起るという仮定であるが, 第 5 章 5-4-4 で考察したように露点位置が高温側表面近くになった場合には, 断湿面側ばかりでなく, 材料の内部においても凝縮が生じる可能性もあり注意を要する。

次に近似について考察する。第 1 点として, 温度勾配による液水移動を無視していることであり, 図 8-11 に軟質繊維板についての $D_{T\ell}$, 比較のために D_{Tv} を示したが, 決して小さくはない。Vos も彼の実験との比較において, 温度勾配が大きくなると合わなくなることを述べている。第 2 に, 重要な点として, wet zone 内での水蒸気移動と液水移動との相殺仮定がある。第 7 章, 7-7 において述べたごとく, wet zone 内で決して零とはなっていない。たとえこの仮定が結露過程において定性的に許されるとしても, 蒸発過程においては成立しない。すなわち, 蒸発過程においては液水移動の方向と水蒸気移動の方向が同じであるか, 逆方向でも液水移動が水蒸気移動に比して大きいからである。しかし, 蒸発過程について適用した場合には, 蒸発量が少なくなり安全側にはなっている。

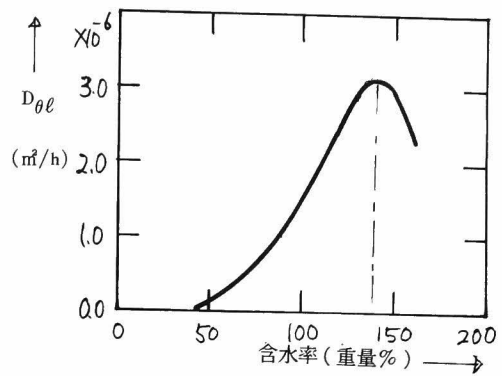


図 8-10 軟質繊維板の $D_{\theta\ell}$

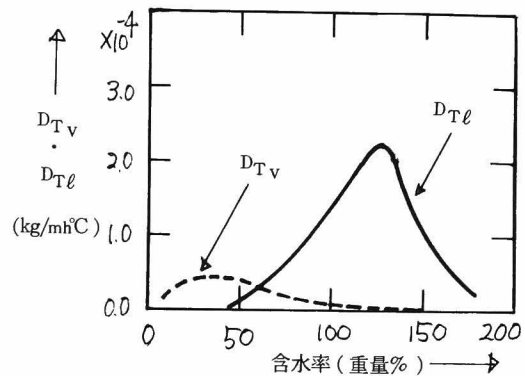


図 8-11 軟質繊維板の D_{Tv} , $D_{T\ell}$

以上のように、Vosの方法には種々の問題がある。ここで、本研究において用いた軟質繊維板の実験結果と Vosの方法による計算結果の比較を行なった。限界含水率は軟質繊維板について明確に決定し得ないので、実験結果の平均含水率 $\theta'_c = 90$ 重量%を使用した。図 8-12 に、三種類の内部結露実験とVosの方法による計算の結果を示す。図から分るように、結果に大きな差が生じている。基本的な差の原因は、先に述べた相殺仮定にあると思われる。すなわち、相殺仮定によってwet zone内での含水率増加が考慮されず、すべてwet front に蓄積されるということから実際より速くfrontが進むからである。

Vosの方法の問題点を考察したが、この方法を適用する場合の要点を以下に示す。

- 1) 最終平衡に至る経過時間と吸湿量との関係が代数的に求められる。
- 2) θ_c に相当する含水率が決定できる材料を選ぶこと。
- 3) 材料内の含水率分布はwet zone内で一定であり、局所的な含水率の変化は予測し得ない。
- 4) wet zone 内での相殺仮定のため吸湿量が少なめに出る。蒸発過程に適用すると大きな誤差を生じさせるが、材料内残留含水率を予測する場合安全側となる。
- 5) 片面断湿の条件の場合に適用できる。

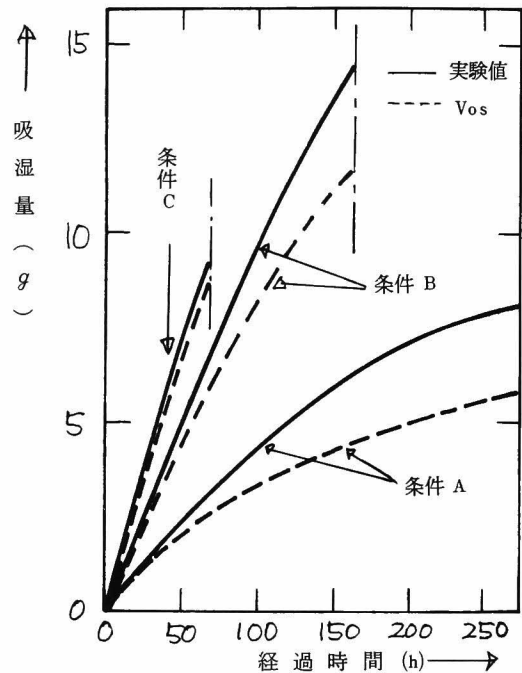


図 8-12 Vosの方法による計算値と実験値の比較

8-4 含水率分布を考慮した近似計算法^{67, 74)}

8-3において、従来用いられてきた近似計算法の基礎式による位置づけとその問題点を明らかにした。Vosの方法において液水移動が考慮されるようになったが、結露障害防止の観点から重要な要素になる含水率の分布形が求められないこと、wet zoneにおいて液と水蒸気移動が平衡しているという仮定をおいていることから、材料内への吸湿量がすべてwet frontで凝縮していることになり実際より早く平衡に達してしまう。さらに、この仮定により蒸発過

程に適用すれば大きな誤差を生じる。

ここでは、軟質繊維板の実験結果および基礎式に基づき、材料内の含水率分布が予測できる近似計算法を述べる。

8-4-1 近似計算法の特徴

ここで述べる近似計算法の特徴は含水率分布の予測が可能なことである。含水率分布を考慮することにより次の利点が挙げられる、

1) 結露の障害は材料内に含まれる全含水量によるばかりでなく、局所的な含水率によって起る場合も多く、このような問題に適用できる。

2) 含水率分布形が与えられるので、温度勾配および含水率勾配による液と水蒸気成分を含む全水分の移動が考慮できる。

3) 分布形を決定する条件として境界における水分移動量を与えることができるから、片面断湿という条件以外にも適用できる。

4) 温度勾配と含水率勾配の移動を考慮しているため、結露過程ばかりでなく蒸発過程にも適用できる。

8-4-2 近似計算法の考え方

a) wet zone, dry zone と wet front

第3章3-5で述べたごとく、水蒸気移動および液水移動は次式で与えられる。

水蒸気移動に対して

$$q_v = -k_v \nabla X \quad (8-38)$$

液水移動に対して

$$q_\ell = -D_{\theta\ell} \nabla \theta - D_{T\ell} \nabla T \quad (8-39)$$

また、液、水蒸気移動をまとめた水分移動は、局所平衡を仮定すると

$$q_w = -D_\theta \nabla \theta - D_T \nabla T \quad (8-40)$$

である。

前章7-7において、結露過程の水分移動は水蒸気移動のみの領域と液・水蒸気移動の共存する領域が存在し、かつ水蒸気移動のみの領域における水分移動量が材料内水分蓄積に大きく効くことがわかった。また、材料内絶対湿度分布を見てみると、水蒸気移動のみの領域におい

てはほぼ直線的な分布をしており、共存する領域ではほとんど飽和絶対湿度に近い値をとっていることが知れた。さらに、このような領域は時間とともに変化し、飽和絶対湿度を取る領域が増大し、最終平衡時には、ほぼ露点位置に対応する点で両者が分離されていることがわかる。このような事実から、結露過程における材料内水分移動の形態を二つに分類して近似計算法を考察する。

この領域を分ける限界の含水率，すなわち，飽和絶対湿度と見なせる下限の含水率を決める。ここでは，この含水率を見かけの RH 100 % に対応する含水率という。この含水率以下の領域を水蒸気移動のみが生じる領域 (dry zone) とし，この範囲内の湿気伝導率 k_v は一定と考える。また，この範囲では水分蓄積は無いと考える。すなわち，dry zone 内では絶対湿度分布は直線と仮定する。見かけの RH 100 % に対応する含水率以上の値を取る領域を wet zone とし，液・水蒸気成分が移動する。この領域での絶対湿度分布は飽和絶対湿度分布に等しいとする。これら両者の領域の境界を wet front とする。ここで用いた見かけのという言葉は，理論的な RH 100 % に対応する含水率が材料の全空隙をすべて満たした飽水含水率であることから使用している。

見かけの RH 100 % に対応する含水率は以下のごとく決定した。すなわち，内部結露実験の条件 A，B に対して，空気温を与えた理論計算の各実験における吸湿速度に，dry zone 内での近似吸湿速度が一致するよう見かけの RH 100 % に対応する含水率を決定した。まず見かけの RH 100 % に対応する含水率を 35, 40, 45, 50 重量% と仮定し，その値で各時刻の wet front

の位置を求め，その位置での温度したがって飽和絶対湿度を決め，次式

$$q_v = k_v \frac{X_i - X_{fs}}{L - x_f} \quad (8-41)$$

から吸湿速度を計算する。このようにして求めた吸湿速度と理論計算より得られた吸湿速度の比較を図 8-13 に示している。ここで，湿気伝導率は $k_v = 2.26 \times 10^{-2} \text{ kg/mh (kg/kg)}$ の値を使用した。実験条件 A の場合，近似吸湿速度はすべての含水率に対してあまり差がなく，理論計算値より僅かに大きくなっている。

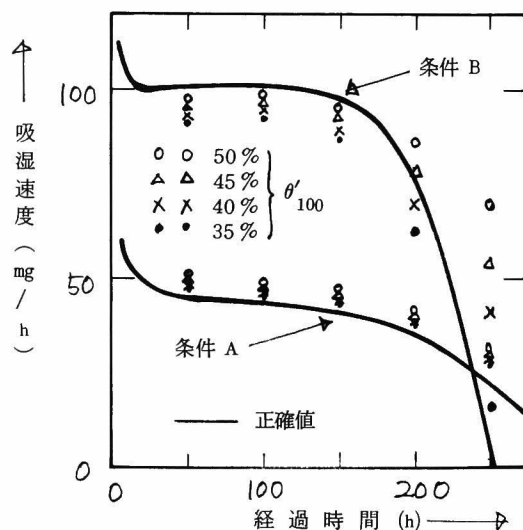


図 8-13 見かけの RH 100 % に対応する含水率と吸湿速度

実験条件Bに対して、含水率が大になるに従って吸湿速度も大きくなり、Aよりも差が大きい。時間的变化では経過時間とともにこの差も大きい。理論値との比較では最初は含水率が大の方ほど近く、時間とともに含水率の小の方に近い結果となっている。結露過程は、実験結果の考察で述べたように吸湿速度一定の範囲が量的にも時間的にも重要であり、この範囲を近似できるように、また、減少速度の範囲においてもあまり大きな差を生じさせないように、見かけのRH 100 %に対応する含水率として45重量%を採用した。第7章図7-5に示している理論の検討に用いた平衡含水率曲線から、この45重量%に対する相対湿度を読みとると、約RH 98 %に相当し、見かけのRH 100 %とすることが妥当であると思われる。

以上の結果から、見かけのRH 100 %に対応する含水率 θ'_{100} を

$$\theta'_{100} = 45 \text{ 重量\%}$$

とすると、

dry zone ($\theta' < \theta'_{100}$) においては、水分移動は水蒸気移動のみで生じ(8-38)式に従う。また、wet zone ($\theta' \geq \theta'_{100}$) においては、水分移動は液・水蒸気移動が共存しており、(8-40)式に従う。

b) wet front の進行

図8-14に、本近似計算法の模式図を示す。低温側の条件は結露実験と対応させて断湿条件で示している。任意の時刻におけるwet frontでの水分収支を考える。dry zone 側から水蒸気移動によって

$$q_v = k_v \frac{X_i - X_{fs}}{L - x_f}$$

だけ入り、wet zone 側から水分移動によって

$$q_w = -D_\theta \left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_{x_f} - D_T \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x_f}$$

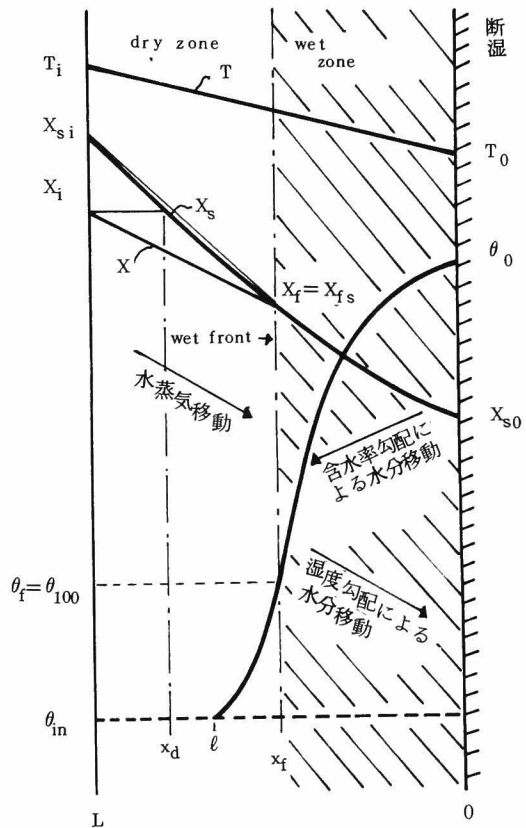


図8-14 近似計算法の模式図

だけ入る。この結果としての wet front における水分蓄積が wet front の進行に寄与する。したがって、この状態を表現すると、 $\theta_f = r\theta'_{100}$ として

$$\theta_f \frac{dx_f}{dt} = k_v \frac{X_i - X_{fs}}{L - x_f} - D_\theta \left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_{x_f} - D_T \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x_f} \quad (8-42)$$

となる。

c) wet zone 内における水分蓄積

(8-42)式によって、wet front の時間変動が求まる。このことにより、dry zone から wet front への水蒸気移動量の時間変化、言いかえると材料内への吸湿量の時間変化が規定される。この吸湿量が wet zone 内での水分蓄積量である。ここでの近似計算法は、wet zone 内における水分蓄積を実験および理論より求められた含水率分布に良く合う分布形で表現し、吸湿量と水分蓄積量とが一致するように分布形の係数を決める方法、いわゆる積分法を採用している。すなわち、任意の時刻において、

$$\int_0^t k_v \frac{X_i - X_{fs}}{L - x_f} dt = \int_0^\ell \theta dx \quad (8-43)$$

が満たされるように分布形の係数を決定する。ここで、 ℓ は浸透深さとし、 $x = \ell$ で $\theta = \theta_{in}$ を取る位置である。この ℓ は (8-43) 式を満足させるためのパラメータである。

d) 材料内含水率分布形

本計算法では材料内の含水率分布形を与えている。後節の計算例では三次式で近似した。分布形の係数を決定する条件としては、低温側の水分移動条件、wet front における条件、浸透深さにおける条件が挙げられる。wet front における条件で、ここでは、含水率分布の特性、すなわち勾配を与えた。結露実験および理論解析で述べたごとく、 $\theta = \theta_{100}$ (45 重量%) における含水率勾配は時間とともに増大し、最終的に露点位置に達した時最大となっていた。最終平衡状態において、wet front の dry zone 側の絶対湿度分布は室内の絶対湿度と同じ値で一定となり吸湿が零となっている。また、wet front の wet zone 側の水分移動は含水率勾配によるものと相殺され零となっている。したがって、以上のような $\theta = \theta_f (= \theta_{100})$ における含水率勾配の特性が表現できるならば、分布形の妥当性および最終平衡時に必ず露点位置において $\theta = \theta_f$ となることが補償される。以下に述べる考察によりこの特性を表現した。

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_{x_f} = \left. \frac{d\theta}{dh} \right|_{\theta_f} \cdot \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x_f} \quad (8-44)$$

と表現できる。ここで、 $d\theta/dh|_{\theta_f}$ は材料特性である。また、 $\partial h/\partial x|_{x_f}$ は材料内の絶対湿度分布と飽和絶対湿度分布とより求めることができる。 $d\theta/dh|_{\theta_f}$ は平衡含水率曲線より

一意的に決まるものであるが、最終平衡時の状態より決定することもできる。すなわち、相対湿度は

$$h = \frac{X}{X_s} \quad (8-45)$$

よって、最終平衡時における $\partial h / \partial x |_{x_d}$ は

$$\left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x_d} = \left. \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{X}{X_s} \right) \right|_{x_d} \quad (8-46)$$

また、wet front の wet zone 側の水分流がこの時に零となることから

$$\begin{aligned} -D_\theta \left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_{x_d} - D_T \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x_d} &= 0 \\ -D_\theta \left. \frac{d\theta}{dh} \right|_{\theta_f} \cdot \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x_d} - D_T \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x_d} &= 0 \\ \left. \frac{d\theta}{dh} \right|_{\theta_f} &= - \left. \frac{D_T}{D_\theta} \right|_{\theta_f} \cdot \frac{\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x_d}}{\left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x_d}} = - \left. \frac{D_T}{D_\theta} \right|_{\theta_f} \frac{\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x_d}}{\left. \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{X}{X_s} \right) \right|_{x_d}} \end{aligned} \quad (8-47)$$

ここで、右辺の $\epsilon_d = D_T / D_\theta |_{\theta_f}$ は材料の特性値から、 $\partial T / \partial x |_{x_d}$ 、 $\partial (X/X_s) / \partial x |_{x_d}$ は最終平衡状態から求まるから、 $d\theta / dh |_{\theta_f}$ が決定できる。この値を定数値 R と表現すると

$$R = \left. \frac{d\theta}{dh} \right|_{\theta_f} \quad (8-48)$$

任意の wet front における含水率勾配はそれゆえ

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_{x_f} = \left. \frac{d\theta}{dh} \right|_{\theta_f} \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x_f} = R \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x_f} \quad (8-49)$$

によって与えることができる。

任意の位置における $\partial h / \partial x |_{x_f}$ は材料内の絶対湿度分布と飽和絶対湿度分布とより求められる。我々の近似計算法における両者の分布は図 8-14 に示した模式図で明らかのように、dry zone で絶対湿度分布は直線、飽和絶対湿度分布は温度分布を直線としこれに対応した二次曲線で表現している。そこで、このように両者の分布を与えることで (8-49) による含水率勾配が実際の含水率勾配とどの程度一致するか見ておく必要がある。図 8-15 に、実験条件 B に対応する条件での理論計算結果から得られた $\theta = \theta_f$ における $\partial h / \partial x |_{x_f}$ の時間変化と

本近似計算法での絶対湿度分布より求めた $\partial h / \partial x |_{x_f}$ とを示す。図から分るように、理論式から求めた値の変化と大きな差が見られる。この原因は、dry zone 全領域において絶対湿度分布を直線とおいたことによるとと思われる。すなわち実際の絶対湿度分布は第7章7-7において示されているように、dry zone の高温側は直線分布となっているが、wet front に相当する部分は僅かに下に凸の分布をしている。したがって、本計算法では、この直線近似による h 分布に及ぼす影響の修正として、各位置において h 分布を求める時の飽和絶対湿度分布はその位置の X_{fs} と X_{si} とを結ぶ直線とした。すなわち、

$$X_s = \frac{X_{si} - X_{fs}}{L - x_f} x + \frac{LX_{fs} - X_{si}x_f}{L - x_f} \quad (8-50)$$

また、

$$X = \frac{X_i - X_{fs}}{L - x_f} x + \frac{LX_{fs} - X_i x_f}{L - x_f} \quad (8-51)$$

したがって

$$h = \frac{X}{X_s} = \frac{(X_i - X_{fs})x + (LX_{fs} - X_i x_f)}{(X_{si} - X_{fs})x + (LX_{fs} - X_{si}x_f)} \quad (8-52)$$

よって

$$\left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x_f} = \frac{X_i - X_{si}}{X_{fs}(L - x_f)} \quad (8-53)$$

以上の修正をすることによって得られた $\partial h / \partial x |_{x_f}$ を図8-15に修正値として示した。かなり良く理論計算結果と一致していることがわかる。

結局、任意の wet front における含水率勾配は、(8-49)(8-53)から

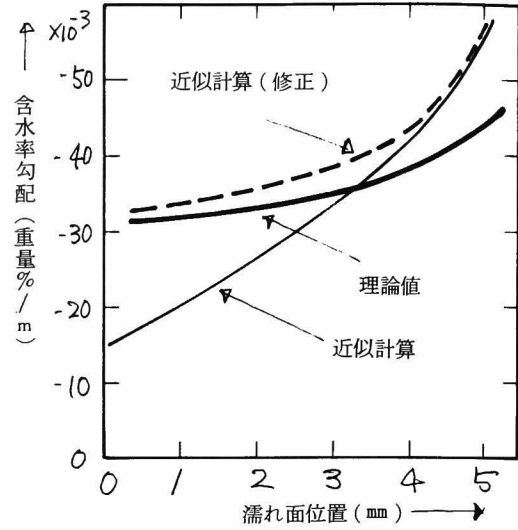


図8-15 濡れ面位置 ($\theta' = 45$)における含水率勾配

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_{x_f} = R \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x_f} = R \frac{X_i - X_{s_i}}{X_{fs}(L - x_f)} \quad (8-54)$$

によって表現できる。

8-4-3 本近似計算法の基礎式による位置づけ

本計算法の仮定は以下のごとくである。すなわち、

- 1) 最初材料は乾燥している
- 2) 熱伝導は定常

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

- 3) λ , k_v は一定
- 4) 凝縮熱無視 $L = 0$

5) 水蒸気移動の支配的な領域 (dry zone) と水蒸気移動と液水移動の共存する領域 (wet zone) に分ける。

- 6) 材料内含水率分布形を仮定する
- 7) dry zone においては吸放湿無視

以上の仮定のもとに、基礎式に基づき整理すると
dry zone において

$$\frac{\partial^2 X}{\partial x^2} = 0 \quad (8-4)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad (8-5)$$

wet zone において

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (8-55)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad (8-56)$$

境界条件は

低温側で断湿条件の場合

$$-D_\theta \left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_0 - D_T \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_0 = 0 \quad (8-57)$$

$$X_{s0} = X_{s0}(T) \quad (8-58)$$

wet front ($x = x_f$) で

$$X_f = X_{fs} = X_{fs}(T) \quad (8-59)$$

$$\theta_f = \theta_{100} \quad (8-60)$$

$$\theta_f \frac{dx_f}{dt} = k_v \frac{X_i - X_{fs}}{L - x_f} - D_\theta \left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_{x_f} - D_T \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x_f} \quad (8-42)$$

室内側 ($x = L$) で

$$X = X_i \quad (8-61)$$

初期条件は ($t = 0$)

$$\theta = \theta_{in} \quad (8-62)$$

ここで、材料内水分収支を保つため、wet front へ dry zone 側から入る吸湿量と材料内含水率分布形より決まる水分蓄積量とが等しいという条件

$$\int_0^t k_v \frac{X_i - X_{fs}}{L - x_f} dt = \int_0^L \theta dx \quad (8-43)$$

によって wet zone 内での含水率分布の変化を求める。

8-4-4 計算例

ここでは、軟質繊維板について、片面断湿条件下の結露過程について計算を行なう。以下の函数近似を行なう。

1) 材料内温度分布は直線近似

$$T = \frac{T_i - T_0}{L} x + T_0 = dx + T_0 \quad (8-63)$$

よって

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_i - T_0}{L} = d \quad (8-64)$$

2) 材料内飽和絶対湿度は二次曲線近似

$$\begin{aligned} X_s &= a'_1 T^2 + a'_2 T + a'_3 = a'_1 (dx + T_0)^2 + a'_2 (dx + T_0) + a'_3 \\ &= a'_1 d^2 x^2 + (2a'_1 d T_0 + a'_2 d) x + a'_1 T_0^2 + a'_2 T_0 + a'_3 \\ &= a_1 x^2 + a_2 x + a_3 \end{aligned} \quad (8-65)$$

3) 材料内含水率分布は三次式近似

$$\theta = b_1 x^3 + b_2 x^2 + b_3 x + b_4 \quad (8-66)$$

分布形を決定する条件は

a) 断湿面 ($x=0$) で

$$\begin{aligned} -D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_0 - D_T \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_0 &= 0 \\ -D_\theta \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_0 + \frac{D_T}{D_\theta} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_0 \right) &= -D_\theta \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_0 + \epsilon_0 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_0 \right) = 0 \end{aligned}$$

よって

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_0 + \epsilon_0 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_0 = 0 \quad (8-67)$$

$$\text{ここで, } \epsilon_0 = m\theta_0 - n \quad (8-68)$$

なる近似を行なう。また,

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_0 = b_3, \quad \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_0 = d, \quad \theta_0 = b_4$$

であるから, (8-67) は

$$b_3 + d(m b_4 - n) = 0$$

$$\text{よって} \quad b_3 + d m b_4 = d n \quad (8-69)$$

b) wet front ($x=x_f$) で $\theta = \theta_f$, すなわち

$$b_1 x_f^3 + b_2 x_f^2 + b_3 x_f + b_4 = \theta_f \quad (8-70)$$

c) wet front ($x=x_f$) で

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x_f} = R \frac{X_i - X_{si}}{X_{fs} (L - x_f)} = Q$$

であるから,

$$3 b_1 x_f^2 + 2 b_2 x_f + b_3 = Q \quad (8-71)$$

d) $x = \ell$ で $\theta = \theta_{in}$, すなわち

$$b_1 \ell^3 + b_2 \ell^2 + b_3 \ell + b_4 = \theta_{in} \quad (8-72)$$

以上の4つの条件より三次式の係数が決定される。行列表示すると、

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & md \\ x_f^3 & x_f^2 & x_f & 1 \\ 3x_f^2 & 2x_f & 1 & 0 \\ \ell^3 & \ell^2 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} dn \\ \theta_f \\ Q \\ \theta_{in} \end{pmatrix} \quad (8-73)$$

すなわち

$$[A] [B] = [C] \quad (8-74)$$

(8-73) から分るように、三次式の係数は ℓ を変数とする x_f の関数である。各係数について解くと

$$|A| = f_1 x_f^3 + f_2 x_f^2 + f_3 x_f \quad (8-75)$$

$$b_1 = \frac{1}{|A|} \{ (f_4 x_f^2 + f_5 x_f + f_6) + Q (f_7 x_f^2 + f_8 x_f + f_9) \} = \frac{b_1'}{|A|}$$

$$b_2 = \frac{1}{|A|} \{ (f_{10} x_f^3 + f_{11} x_f^2 + f_{12} x_f + f_{13}) + Q (f_{14} x_f^3 + f_{15} x_f^2 + f_{16} x_f + f_{17}) \} = \frac{b_2'}{|A|}$$

$$b_3 = \frac{1}{|A|} \{ (f_{18} x_f^4 + f_{19} x_f^3 + f_{20} x_f^2 + f_{21} x_f) + Q (f_{22} x_f^4 + f_{23} x_f^3 + f_{24} x_f^2) \} = \frac{b_3'}{|A|}$$

$$b_4 = \frac{1}{|A|} \{ (f_{25} x_f^4 + f_{26} x_f^3 + f_{27} x_f^2 + f_{28} x_f + f_{29}) + Q (f_{30} x_f^4 + f_{31} x_f^3 + f_{32} x_f^2) \} = \frac{b_4'}{|A|}$$

ここで

$$Q = R \frac{X_i - X_{si}}{X_{fs} (L - x_f)} = R \frac{(X_i - X_{si})}{(a_1 x_f^2 + a_2 x_f + a_3) (L - x_f)} = \frac{f_{36}}{f_{32} x_f^3 + f_{33} x_f^2 + f_{34} x_f + f_{35}} = \frac{q_2}{q_1}$$

したがって

$$q_3 = |A| \cdot q_1 = g_1 x_f^6 + g_2 x_f^5 + g_3 x_f^4 + g_4 x_f^3 + g_5 x_f^2 + g_6 x_f$$

とすると

$$\left. \begin{aligned} b_1 &= \frac{1}{q_3} \{ g_7 x_f^5 + g_8 x_f^4 + g_9 x_f^3 + g_{10} x_f^2 + g_{11} x_f + g_{12} \} = \frac{b_1''}{q_3} \\ b_2 &= \frac{1}{q_3} \{ g_{13} x_f^6 + g_{14} x_f^5 + g_{15} x_f^4 + g_{16} x_f^3 + g_{17} x_f^2 + g_{18} x_f + g_{19} \} = \frac{b_2''}{q_3} \\ b_3 &= \frac{1}{q_3} \{ g_{20} x_f^7 + g_{21} x_f^6 + g_{22} x_f^5 + g_{23} x_f^4 + g_{24} x_f^3 + g_{25} x_f^2 + g_{26} x_f \} = \frac{b_3''}{q_3} \\ b_4 &= \frac{1}{q_3} \{ g_{27} x_f^7 + g_{28} x_f^6 + g_{29} x_f^5 + g_{30} x_f^4 + g_{31} x_f^3 + g_{32} x_f^2 + g_{33} x_f \} = \frac{b_4''}{q_3} \end{aligned} \right\} \quad (8-76)$$

となる。wet front の移動は (8-42) から

$$\begin{aligned}
 \theta_f \frac{df_f}{dt} &= k_v \frac{X_i - X_{fs}}{L - x_f} - D_\theta \left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_{x_f} - D_T \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x_f} \\
 &= k_v \frac{X_i - (a_1 x_f^2 + a_2 x_f + a_3)}{L - x_f} - D_{\theta f} (3 b_1 x_f^2 + 2 b_2 x_f + b_3) - D_{T f} d \\
 &= \frac{k_v \{ X_i - (a_1 x_f^2 + a_2 x_f + a_3) \} - D_{\theta f} (3 b_1 x_f^2 + 2 b_2 x_f + b_3) (L - x_f) - D_{\theta f} \epsilon_f (L - x_f)}{L - x_f} \\
 &= \frac{3 D_{\theta f} b_1 x_f^3 + (-k_v a_1 - 3 D_{\theta f} L b_1 + 2 D_{\theta f} b_2) x_f^2 + [(k_v a_2 + d D_{\theta f} \epsilon_f) - 2 D_{\theta f} L b_2 + D_{\theta f} b_3] x_f + [k_v (X_i - a_3) - D_{\theta f} \epsilon_f d L] - D_{\theta f} L b_3}{L - x_f} \\
 &= \frac{h_1 b_1 x_f^3 + (h_2 + h_3 b_1 + h_4 b_2) x_f^2 + (h_5 + h_6 b_2 + h_7 b_3) x_f + (h_8 + h_9 b_3)}{h_{10}} \\
 &= \frac{h_{18} x_f^7 + h_{19} x_f^6 + h_{20} x_f^5 + h_{21} x_f^4 + h_{22} x_f^3 + h_{23} x_f^2 + h_{24} x_f + h_{25}}{h_{11} x_f^6 + h_{12} x_f^5 + h_{13} x_f^4 + h_{14} x_f^3 + h_{15} x_f^2 + h_{16} x_f + h_{17}}
 \end{aligned} \tag{8-77}$$

よって

$$dt = \theta_f \frac{h_{11} x_f^6 + h_{12} x_f^5 + h_{13} x_f^4 + h_{14} x_f^3 + h_{15} x_f^2 + h_{16} x_f + h_{17}}{h_{18} x_f^7 + h_{19} x_f^6 + h_{20} x_f^5 + h_{21} x_f^4 + h_{22} x_f^3 + h_{23} x_f^2 + h_{24} x_f + h_{25}} dx_f \tag{8-78}$$

以下に各係数の関係を示す。ただし、 $\ell = x_f + \ell'$ として計算している。また、実験結果、移動係数は整理の都合上、含水率を重量%で表現しているのでも重量% θ' で計算した。すなわち、 $\theta = r \theta'$ の関係がある。

$$\begin{aligned}
 f_1 &= -m d \ell'^2 & f_2 &= -m d \ell'^3 + 3 \ell'^2 \\
 f_3 &= 2 \ell'^3 & f_4 &= -m d (\theta'_{in} - \theta'_f) \\
 f_5 &= 2 (\theta'_{in} - \theta'_f) & f_6 &= -m d \theta'_f \ell'^2 + n d \ell'^2 \\
 f_7 &= m d \ell' & f_8 &= m d \ell' \\
 f_9 &= -\ell'^2 & f_{10} &= 2 m d (\theta'_{in} - \theta'_f) \\
 f_{11} &= -3 (\theta'_{in} - \theta'_f) & f_{12} &= 3 m d \ell'^2 \theta'_f - 3 n d \ell'^2 \\
 f_{13} &= m d \ell'^3 \theta'_f - n d \ell'^3 & f_{14} &= -2 m d \ell' \\
 f_{15} &= -3 m d \ell'^2 & f_{16} &= -m d \ell'^3 \\
 f_{17} &= \ell'^3 & f_{18} &= -m d (\theta'_{in} - \theta'_f)
 \end{aligned}$$

$$f_{19} = 0$$

$$f_{21} = 2 \text{nd } \ell'^3 - 2 \text{md } \ell'^3 \theta'_f$$

$$f_{23} = 2 \text{md } \ell'^2$$

$$f_{25} = \theta'_{\text{in}} - \theta'_f$$

$$f_{27} = -\text{nd } \ell'^3 + 3 \ell'^2 \theta'_f$$

$$f_{29} = -\ell'$$

$$f_{31} = -\ell'^3$$

$$f_{33} = a_1 L - a_2$$

$$f_{35} = a_3 L$$

$$g_1 = f_1 f_{32}$$

$$g_3 = f_1 f_{34} + f_2 f_{33} + f_3 f_{32}$$

$$g_5 = f_2 f_{35} + f_3 f_{34}$$

$$g_7 = f_4 f_{32}$$

$$g_9 = f_4 f_{34} + f_5 f_{33} + f_6 f_{32}$$

$$g_{11} = f_5 f_{35} + f_6 f_{34} + f_8 f_{36}$$

$$g_{13} = f_{10} f_{32}$$

$$g_{15} = f_{10} f_{34} + f_{11} f_{33} + f_{12} f_{32}$$

$$g_{17} = f_{11} f_{35} + f_{12} f_{34} + f_{13} f_{33} + f_{15} f_{36}$$

$$g_{19} = f_{13} f_{35} + f_{17} f_{36}$$

$$g_{21} = f_{18} f_{33} + f_{19} f_{32}$$

$$g_{23} = f_{18} f_{35} + f_{19} f_{34} + f_{20} f_{33} + f_{21} f_{32} + f_{22} f_{36}$$

$$g_{25} = f_{20} f_{35} + f_{21} f_{34} + f_{24} f_{36}$$

$$g_{27} = f_{25} f_{32}$$

$$g_{29} = f_{25} f_{34} + f_{26} f_{33} + f_{27} f_{32}$$

$$g_{31} = f_{26} f_{35} + f_{27} f_{34} + f_{28} f_{33} + f_{30} f_{36}$$

$$g_{33} = f_{28} f_{35}$$

$$h_1 = 3 D_{\theta_f}$$

$$h_3 = -3 D_{\theta_f} L$$

$$h_5 = k_v a_2 + d D_{\theta_f} \delta_f$$

$$h_7 = D_{\theta_f}$$

$$f_{20} = 3 \text{nd } \ell'^2 - 3 \text{md } \ell'^2 \theta'_f$$

$$f_{22} = \text{md } \ell'$$

$$f_{24} = \text{md } \ell'^3$$

$$f_{26} = -\text{nd } \ell'^2$$

$$f_{28} = 2 \theta'_f \ell'^3$$

$$f_{30} = -2 \ell'^2$$

$$f_{32} = -a_1$$

$$f_{34} = a_2 L - a_3$$

$$f_{36} = X_i - X_{s_i}$$

$$g_2 = f_1 f_{33} + f_2 f_{32}$$

$$g_4 = f_1 f_{35} + f_2 f_{34} + f_3 f_{33}$$

$$g_6 = f_3 f_{35}$$

$$g_8 = f_4 f_{33} + f_5 f_{32}$$

$$g_{10} = f_4 f_{35} + f_5 f_{34} + f_6 f_{33} + f_7 f_{36}$$

$$g_{12} = f_6 f_{35} + f_9 f_{36}$$

$$g_{14} = f_{10} f_{33} + f_{11} f_{32}$$

$$g_{16} = f_{10} f_{35} + f_{11} f_{34} + f_{12} f_{33} + f_{13} f_{32} + f_{14} f_{36}$$

$$g_{18} = f_{12} f_{35} + f_{13} f_{34} + f_{16} f_{36}$$

$$g_{20} = f_{18} f_{32}$$

$$g_{22} = f_{18} f_{34} + f_{19} f_{33} + f_{20} f_{32}$$

$$g_{24} = f_{19} f_{35} + f_{20} f_{34} + f_{21} f_{33} + f_{23} f_{36}$$

$$g_{26} = f_{21} f_{35}$$

$$g_{28} = f_{25} f_{33} + f_{26} f_{32}$$

$$g_{30} = f_{25} f_{35} + f_{26} f_{34} + f_{27} f_{33} + f_{28} f_{32} + f_{29} f_{36}$$

$$g_{32} = f_{27} f_{35} + f_{28} f_{34} + f_{31} f_{36}$$

$$h_2 = -k_v a_1$$

$$h_4 = 2 D_{\theta_f}$$

$$h_6 = -2 D_{\theta_f} L$$

$$h_8 = k_v (X_i - a_3) - d D_{\theta_f} \delta_f L$$

$$\begin{aligned}
h_9 &= -D_{\theta_f} L & h_{10} &= L - x_f \\
h_{11} &= -g_1 & h_{12} &= Lg_1 - g_2 \\
h_{13} &= Lg_2 - g_3 & h_{14} &= Lg_3 - g_4 \\
h_{15} &= Lg_4 - g_5 & h_{16} &= Lg_5 - g_6 \\
h_{17} &= Lg_6 & h_{18} &= h_1g_7 + h_2g_1 + h_4g_{13} + h_7g_{20} \\
h_{19} &= h_1g_8 + h_2g_2 + h_3g_7 + h_4g_{14} + h_5g_1 + h_6g_{13} + h_7g_{21} + h_9g_{20} \\
h_{20} &= h_1g_9 + h_2g_3 + h_3g_8 + h_4g_{15} + h_5g_2 + h_6g_{14} + h_7g_{21} + h_8g_1 + h_9g_{21} \\
h_{21} &= h_1g_{10} + h_2g_4 + h_3g_9 + h_4g_{16} + h_5g_3 + h_6g_{15} + h_7g_{22} + h_8g_2 + h_9g_{22} \\
h_{22} &= h_1g_{11} + h_2g_5 + h_3g_{10} + h_4g_{17} + h_5g_4 + h_6g_{16} + h_7g_{23} + h_8g_3 + h_9g_{23} \\
h_{23} &= h_1g_{12} + h_2g_6 + h_3g_{11} + h_4g_{18} + h_5g_5 + h_6g_{17} + h_7g_{24} + h_8g_4 + h_9g_{24} \\
h_{24} &= h_3g_{12} + h_4g_{19} + h_5g_6 + h_6g_{18} + h_7g_{26} + h_8g_5 + h_9g_{25} \\
h_{25} &= h_6g_{19} + h_8g_6 + h_9g_{26}
\end{aligned}$$

計算手順は以下のごとくである。

- 1) x_f と ℓ' を与える。
- 2) (8-76)により含水率分布形を、(8-78)により x_f に至るまでの時間を計算する。
- 3) (8-43)により材料内全体の収支が満足されているかどうかチェックする。
- 4) 水分収支が満たされていない場合、 ℓ' を順次変化させ1), 2), 3)の手順を繰り返して、水分収支が満足するまで行なう。満たされた時点で初めに与えた x_f について計算が終わる。
- 5) 次に x_f を変え同様な計算を行なう。
- 6) x_f が露点位置にきた時に計算が終了する。

表8-1に計算に使用した定数値を示す。表8-2には近似計算を行なった計算条件を示す。条件A, Bはそれぞれ内部結露実験A, Bに対応している。

図8-16に条件A, Bに対する吸湿量の計算結果を、図8-17, 8-18に含水率分布の計算結果を示した。それぞれの図には、比較のために対応する条件で基礎式に基づき求めた正確値も同時に示した。

図8-16の吸湿量の変化から分るように、近似計算結果は正確値とかなり良く一致していると言えるだろう。ただし、初期においては、正確値ではほぼ一定の勾配で上昇しているが近似計算では除々に増加率(吸湿速度)が減少している。この原因は、温度分布を直線近似していること、また、表面温の時間的低下を考慮していないこと、すなわち、含水率による熱伝導

表 8-1 計算に用いた定数

内 容	記号	値	内 容	記号	値
見かけの RH 100 % に対応する含水率	θ'_{100}	0.45 kg/kg	層 厚	L	$8 \times 10^{-3} \text{ m}$
θ'_{100} における含水率勾配による水分伝導率	$D_{\theta f}$	$0.15 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{h}$	飽和絶対湿度を $X_s = a'_1 T^2 + a'_2 T + a'_3$ とおいた時の係数	a'_1	$0.164 \times 10^{-4} \text{ kg/kg/}^\circ\text{C}^2$
θ'_{100} における温度勾配による水分伝導率	$D_{Tf} = c_f D_{\theta f}$	$0.24 \times 10^{-4} \text{ kg/mh}^\circ\text{C}$		a'_2	$0.224 \times 10^{-3} \text{ kg/kg/}^\circ\text{C}$
温度勾配係数 $\epsilon = m \theta' - n$ とおいた時の係数	m	$-68.64 \times 10^{-2} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \text{ h}}$		a'_3	$0.384 \times 10^{-2} \text{ kg/kg'}$
湿 気 伝 導 率	k_v	$2.26 \times 10^{-2} \text{ kg/mh kg/kg'}$	飽和絶対湿度を $X_s = a_1 x^2 + a_2 x + a_3$ とおいた時の係数	a_1	$= a'_1 d^2$
				a_2	$= 2 a'_1 d + a'_2 d$
材 料 密 度	r	240 kg/m^3		a_3	$= a'_1 T_0^2 + a'_2 T_0 + a'_3$

表 8-2 計算に用いた条件

	記号	条 件 A	条 件 B
		値	
室内側表面温	T_i	16.5 (°C)	18.7 (°C)
断湿側表面温	T_0	5.2 (°C)	9.6 (°C)
室内絶対湿度	X_i	7.46 (kg/kg')	11.54 (°C)
初期含水率	θ_{in}	6.0 (重量%)	9.0 (重量%)
露点位置	x_d	3.6 (mm)	5.7 (mm)
材料内温度勾配	d	$1.41 \times 10^{-3} (^\circ\text{C/m})$	$1.14 \times 10^{-3} (^\circ\text{C/m})$

率の変化を考慮していないためと考えられる。また、条件 A は B より正確値との差が大きい。

図 8-17, 8-18 の含水率分布の時間経過もほぼ良く一致していると思われる。ただし、条件 A の場合、近似計算の含水率分布形が正確値の分布形と異なる。すなわち、変曲点の出来る形となっている。これは、分布形の三次式近似と濡れ面における含水率勾配を与えた仮定の結果であると思われる。条件 B の場合は、初期において良く一致しているが、最終平衡に近づくに従い高い含水率の部分で差が見られる。この差も温度分布を直線とおいているため、理論

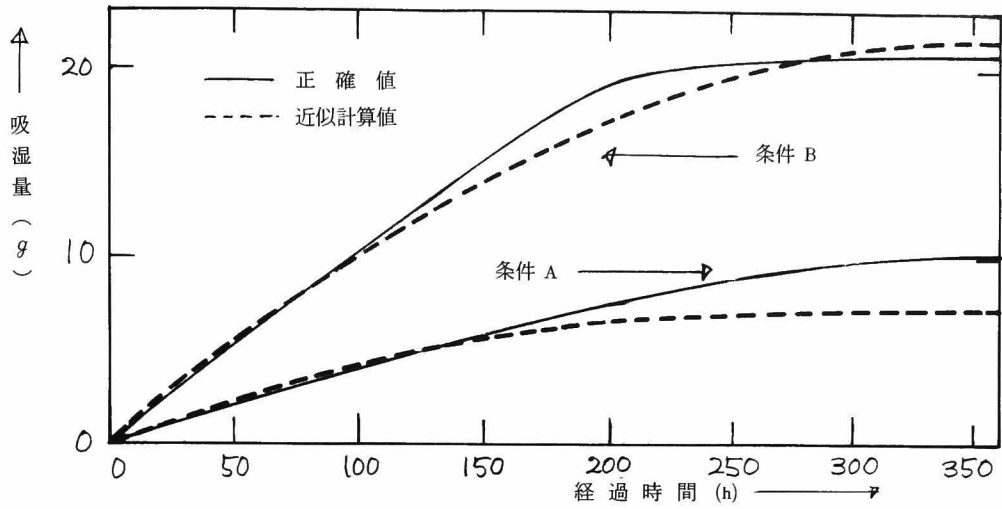


図 8-16 吸湿量の近似計算値と正確値との比較

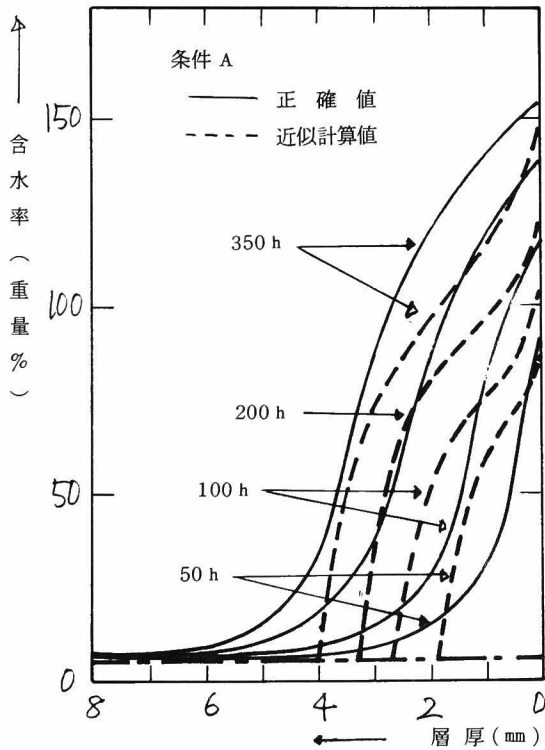


図 8-17 含水率分布の近似計算値と正確値との比較

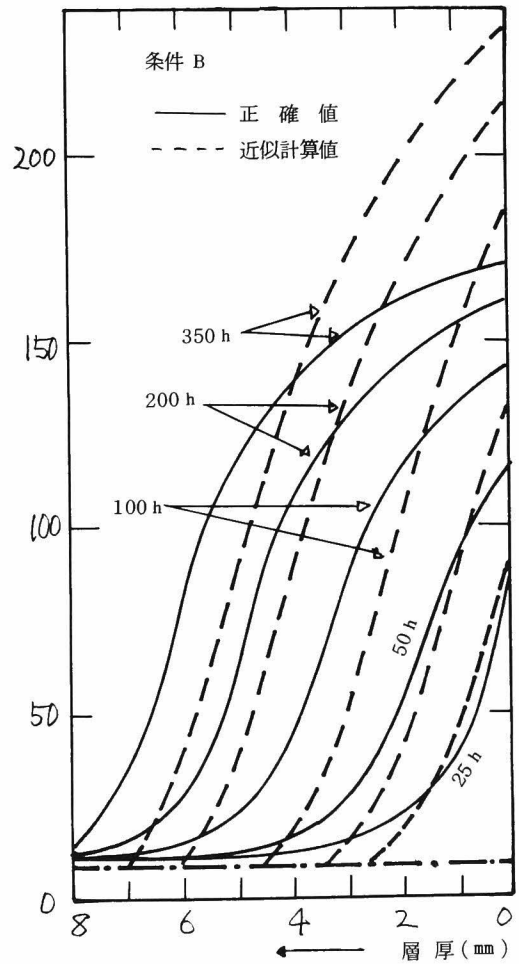


図 8-18 含水率分布の近似計算値と正確値との比較

よりも多く温度勾配によって水分が移動し、したがって、これに対応して含水率による水分移動が多くなり結果として高い含水率を示したと考えられる。

以上、正確値と比較することによって、ここで提案した近似計算法を検討したが、多少の差異は見られるものの、吸湿量、含水率分布とも近似計算としては良く一致しており、この方法でかなり予測し得ると考えられる。なお、この近似計算法は解析的に解くことはできなく、数値計算によって求められなくてはならない。計算には、京大の大型計算機を使用した。条件 B に対応する計算で結露後 250 時間の経過を知るために、正確解では約 600 秒必要であるのに対し、近似計算で約 10 秒で行えた。

目的で述べたごとく、簡便でなおかつ現象を大略つかまえられる近似計算法としては、今回の方法ではほぼ満足のゆく結果が得られると言えよう。

ただし、今後の研究としては、近似の仮定がどの範囲まで適用できるのか、また、結露後の蒸発過程においても適用してみること、他の材料においても適用してみることが挙げられよう。

8-5 第 8 章のまとめ

熱水分同時移動方程式は非線型であり、方程式に現われる移動係数も数多く同定も複雑である。また問題によっては正確に現象を知る必要のない場合も多くある。このことから近似計算法が必要とされる。本章においては、従来の近似計算法および新たな近似計算法について検討した。以下に検討結果をまとめて示す。

i) 従来の近似計算法として、定常結露防止計算法、H. Glaser の方法、B. H. Vos の方法を取り上げた。

ii) 各計算法について、本研究で用いられた基礎式に基づき整理した。また、これらの方法についての概要および適用範囲と問題点について述べた。

iii) 従来の近似計算法において、水分移動を考慮したのは B. H. Vos の方法である。しかし、この方法は全吸湿量および主に含水している範囲の時間経過を求めることができるが、材料内含水率分布は予測し得ない。また、本研究において用いた軟質繊維板のような材料特性を持つ場合には現象と大きな差を生じる。そこで、実験結果および理解の検討結果から、材料内含水率分布が予測出来かつ現象を大略予測し得る近似計算法を示した。近似計算法による結果と正確値とはほぼ良く一致していた。なお、計算法において用いた仮定についてその適用範囲についての検討がなお残されている。

記 号

A_i	=	i 相の全系に対する容積比 $[\text{m}^3/\text{m}^3\text{材料}]$
a	=	空隙率 $[\text{m}^3/\text{m}^3\text{材料}]$
C	=	湿り材料の比熱 $[\text{Kcal}/\text{kg } ^\circ\text{C}]$
C_s	=	乾燥材料の比熱 $[\text{Kcal}/\text{kg kg}]$
C_w	=	液水の比熱 $[\text{Kcal}/\text{kg } ^\circ\text{C}]$
D_{atm}	=	空気中の水蒸気拡散係数 $[\text{m}^2/\text{h}]$
D_{osm}	=	液中のコロイド溶質濃度に対する拡散係数 $[\text{m}^2/\text{h}]$
D_θ	=	含水率勾配による水分伝導率 $[\text{m}^2/\text{h}]$
$D_{\theta f}$	=	wet front における含水率勾配による水分伝導率 $[\text{m}^2/\text{h}]$
$D_{\theta v}$	=	含水率勾配による水蒸気成分の水分伝導率 $[\text{m}^2/\text{h}]$
$D_{\theta \ell}$	=	含水率勾配による液水成分の水分伝導率 $[\text{m}^2/\text{h}]$
D_T	=	温度勾配による水分伝導率 $[\text{kg}/\text{m h } ^\circ\text{C}]$
D_{Tf}	=	wet front における温度勾配による水分伝導率 $[\text{kg}/\text{m h } ^\circ\text{C}]$
D_{Tv}	=	温度勾配による水蒸気成分の水分伝導率 $[\text{kg}/\text{m h } ^\circ\text{C}]$
$D_{T\ell}$	=	温度勾配による液水成分の水分伝導率 $[\text{kg}/\text{m h } ^\circ\text{C}]$
F_i	=	i 相に働く外力 $[\text{N}/\text{kg}]$
F_v	=	水蒸気成分に働く外力 $[\text{N}/\text{kg}]$
F_a	=	乾燥空気成分に働く外力 $[\text{N}/\text{kg}]$
F_w	=	液水成分に働く外力 $[\text{N}/\text{kg}]$
f_{12}	=	1 相と 2 相間の相互作用による摩擦力 $[\text{N}/\text{kg}]$
g	=	重力の加速度 $[\text{m}/\text{h}^2]$
h	=	相対湿度 $[-]$
I_ℓ	=	液水のエンタルピー $[\text{Kcal}/\text{kg}]$
I_v	=	水蒸気のエンタルピー $[\text{Kcal}/\text{kg}]$
$J_{w(ij)}$	=	i, j 相間の水分流 $[\text{kg}/\text{m}^2 \text{h}]$
K	=	不飽和水分伝導率 $[\text{m}/\text{h}]$
k_v	=	湿気伝導率 $[\text{kg}/\text{m h} (\text{kg}/\text{kg}')]$

L	=	吸着あるいは凝縮熱 $[\text{Kcal}/\text{kg}]$
m_k	=	コロイド溶質の分子量 $[\text{kg}/\text{Kmol}]$
m_v	=	水蒸気の分子量 $[\text{kg}/\text{Kmol}]$
n_s	=	材料単位面積当りの毛細管の本数 $[1/\text{m}^2]$
P	=	全圧 $[\text{kg}/\text{m}^2]$
P_i	=	i 相の熱力学的圧力 $[\text{kg}/\text{m}^2]$
p_a	=	乾燥空気の分圧 $[\text{kg}/\text{m}^2]$
P_{osm}	=	コロイド材料の浸透圧 $[\text{kg}/\text{m}^2]$
p_g	=	湿り空気の圧力 $[\text{kg}/\text{m}^2]$
p_v	=	水蒸気分圧 $[\text{kg}/\text{m}^2]$
q_a	=	乾燥空気流 $[\text{kg}/\text{m}^2 \text{ h}]$
q_g	=	湿り空気流 $[\text{kg}/\text{m}^2 \text{ h}]$
q_h	=	熱流 $[\text{Kcal}/\text{m}^2 \text{ h}]$
q_ℓ	=	液水流 $[\text{kg}/\text{m}^2 \text{ h}]$
q_v	=	水蒸气流 $[\text{kg}/\text{m}^2 \text{ h}]$
$q_{\ell, ka}$	=	材料の毛細管内における液水流 $[\text{kg}/\text{m}^2 \text{ h}]$
$q_{\ell, os}$	=	材料の浸透圧における液水流 $[\text{kg}/\text{m}^2 \text{ h}]$
$q_{v, mi}$	=	材料のミクロな毛細管内における水蒸气流 $[\text{kg}/\text{m}^2 \text{ h}]$
$q_{v, ma}$	=	材料のマクロな毛細管内における水蒸气流 $[\text{kg}/\text{m}^2 \text{ h}]$
$q_{T, v}$	=	温度勾配による水蒸気成分の水蒸气流 $[\text{kg}/\text{m}^2 \text{ h}]$
$q_{T, \ell}$	=	温度勾配による液水成分の液水流 $[\text{kg}/\text{m}^2 \text{ h}]$
$q_{\theta, v}$	=	含水率勾配による水蒸気成分の水蒸气流 $[\text{kg}/\text{m}^2 \text{ h}]$
$q_{\theta, \ell}$	=	含水率勾配による液水成分の液水流 $[\text{kg}/\text{m}^2 \text{ h}]$
q_w	=	水分流 $[\text{kg}/\text{m}^2 \text{ h}]$
R	=	一般ガス定数 $[\text{kg m}/\text{Kmol } ^\circ\text{K}]$
R_w	=	液水のガス定数 $[\text{kg m}/\text{kg } ^\circ\text{K}]$
R_a	=	乾燥空気のガス定数 $[\text{kg m}/\text{kg } ^\circ\text{K}]$
r	=	毛細管半径 $[\text{m}]$
S	=	材料 1 m^3 当りの空隙部表面積 $[\text{m}^2/\text{m}^3]$
S_v	=	水蒸気成分のエントロピー $[\text{J}/\text{kg } ^\circ\text{C}]$
S_w	=	液水成分のエントロピー $[\text{J}/\text{kg } ^\circ\text{C}]$

S_L	=	材料外表面 1 m ² 当りの実質部面積 [m ² /m ²]
S_v	=	材料外表面 1 m ² 当りの空隙面積 [m ² /m ²]
T	=	温度 [°C]
t	=	時間 [h]
V_i	=	$\sum r_{ik} V_{ik} / r_i$ i 相の質量中心速度 [m/h]
V_{ik}	=	i 相 k 成分の速度 [m/h]
V_s	=	固体実質部の質量中心速度 [m/h]
v_v	=	空気中における体積水蒸気流 [m ³ /m ² 空気 h]
v_w	=	体積水分流 [m ³ /m ² h]
X	=	絶対湿度 [kg/kg 乾燥空気]
X_{fs}	=	wet front における飽和絶対湿度 [kg/kg 乾燥空気]
X_i	=	室内絶対湿度 [kg/kg 乾燥空気]
X_{si}	=	室内側表面温に応じる飽和絶対湿度 [kg/kg 乾燥空気]
X_{s0}	=	断湿側表面温に応じる飽和絶対湿度 [kg/kg 乾燥空気]
x	=	位置 [m]
x_d	=	露点位置 [m]
x_f	=	wet front の位置 [m]
α	=	熱伝達率 [Kcal/m ² h °C]
α'	=	湿気伝達率 [kg/m ² h °C]
β	=	相間の湿気伝達率 [kg/m ² h (J/kg)]
ρ	=	材料の密度 [kg/m ³]
ρ_g	=	湿り空気の密度 [kg/m ³]
ρ_i	=	$\sum r_{ik} = A_i \rho_i$ i 相のみかけの密度 [kg/m ³]
ρ_{ik}	=	i 相 k 成分のみかけの密度 [kg/m ³]
ρ_s	=	乾燥材料の密度 [kg/m ³]
ρ_v	=	水蒸気密度 [kg/m ³]
ρ_w	=	水の密度 [kg/m ³]
ϵ	=	D_T / D_θ 温度勾配係数 [kg/m ³ °C]
η	=	粘性係数 [kg/m h]
θ	=	含水時の湿り空気の容積 [m ³ /m ³ 材料]
θ_0	=	固体実質部を除く容積 [m ³ /m ³ 材料]

θ	=	含水率 [kg/m ³]
θ'	=	重量含水率 [kg/kg]
θ_{in}	=	初期含水率 [kg/m ³]
θ_0	=	断湿面における含水率 [kg/m ³]
θ_f	=	wet front における含水率 [kg/m ³]
θ_{100}	=	見かけのRH 100 %に対応する含水率 [kg/m ³]
κ	=	屈曲率 [—]
λ	=	材料の熱伝導率 [Kcal/m h°C]
μ	=	化学ポテンシャル [J/kg]
μ_v	=	水蒸気の化学ポテンシャル [J/kg]
μ_a	=	乾燥空気の化学ポテンシャル [J/kg]
μ_ℓ	=	液水の化学ポテンシャル [J/kg]
μ_{is}	=	i 相固体実質部の化学ポテンシャル [J/kg]
μ_{a0}	=	真の乾燥空気の化学ポテンシャル [J/kg]
$\mu_{\ell 0}$	=	真の液水の化学ポテンシャル [J/kg]
μ_{v0}	=	真の水蒸気の化学ポテンシャル [J/kg]
$\mu_{1\ell}$	=	自由水基準の水蒸気の化学ポテンシャル [J/kg]
$\mu_{2\ell}$	=	自由水基準の液水の化学ポテンシャル [J/kg]
μ_{1v}	=	純水蒸気圧基準の水蒸気の化学ポテンシャル [J/kg]
μ_{2v}	=	純水蒸気圧基準の液水の化学ポテンシャル [J/kg]
ρ_i	=	i 相の真の密度 [kg/m ³]
ρ_v	=	水蒸気の真の密度 [kg/m ³]
ρ_{v0}	=	飽和水蒸気の密度 [kg/m ³]
ρ	=	表面張力 [N/m]
Φ	=	total ポテンシャル [m]
Ψ	=	毛細管ポテンシャル [m]

添 字

a	=	乾燥空気	B	=	材料外表面
g	=	ガス相	i, j	=	i 番目と j 番目の相
i	=	室内側	k	=	k 番目の成分
ℓ	=	液 水	r	=	室
s	=	固体実質部または飽和	v	=	水蒸気
w	=	水 分	0	=	断湿側あるいは室外側
1	=	ガス相	2	=	液相

文 献

- 1) 齊藤平蔵, 建築材料の透湿性に関する実験的研究 1, 2, 日本建築学会論文報告集 57, (1957) など
- 2) 前田敏男, 室内温度に関する研究, 日本建築学会研究報告 21, (1953)
- 3) 前田敏男, 結露防止計画, 日本建築学会研究報告 38, (1957)
- 4) 前田敏男, 吸放湿のある場合の多数室の湿気計算法, 日本建築学会近畿支部熱分科会, (1962)
- 5) 松本 衛, 建築壁体における熱・水分の同時移動および水分蓄積に関する研究, 博士論文, (1978)
- 6) 堀江, 江口, 室内気候に関する材料の吸放湿について, 日本建築学会論文集 69, (1961)
- 7) Van der kooi, Moisture Transport in Cellular Concrete Roofs, Diss. Eindhoven, Uitgeverij Waltman Delft, (1971)
- 8) Glaser, H., Wärmeleitung und Feuchtigkeitsdurchgang durch Kuhlraumisolierungen, Kälte Technik 10, (1958)
- 9) Glaser, H., Temperatur-und Dampfduruckverlauf in einer Homogenen wand bei Feuchtigkeitsausscheidung, Kälte Technik 10, (1958)
- 10) Glaser, H., Vereinfachte Berechnung der Dampfdiffusion durch Geschichtete Wände bei Ausscheidung von Wasser und Eis, Kälte Technik 10, (1958)
- 11) Glaser, H., Graphisches Verfahren zur Untersuchung von Diffusionsvorgängen, Kälte Technik 10, (1958)
- 12) Vos, B. H., Internal Condensation in Structure, Build. Sci. 3, (1969)
- 13) Vos, B. H., Condensation in Flat Roofs under Non-Steady-State Conditions, Build. Sci. 6, (1971)
- 14) Swartzendurber, D., Flow through Porous Media, Chp. 6 The Flow of Water Unsaturated Soils, (1969)
- 15) Philip, J. R., The Teory of Infiltration, Soil Science 83-85, (1956-1957)
- 16) Crank, J., Mathematics of Diffusion, Oxford Univ. Press, (1956)

- 17) Strom, M. L., Heat Conduction in Simple Metals, J. Appl. Phys. 22, (1951)
- 18) Parlange, J. Y., The Theory of Water Movement in Soil, Soil Sci. 111, (1971)
- 19) Lebedeff, A. F., The Movement of Ground and Soil Water, First Int. Congr. Soil Sci. Proc. 1, (1927)
- 20) Rollins, R. L., Movement of Soil Moisture under a Thermal Gradient, Highway Res. Board Proc. 33, (1954)
- 21) Philip, J. R., de Vries, D. A., Moisture Movement in Porous Materials under Temperature Gradient, Trans. Amer. Geophys. Union 38, (1957)
- 22) Luikov, A. V., Transportscheinungen in Kapillar-porösen Körpern, Akademie V. L., (1958)
- 23) Luikov, A. V., Mikhailov, Yu. A., Theory of Energy and Mass Transfer, Prentice Hall, Englewood Cliffs, (1961)
- 24) Prigogine, I., Introduction to Thermodynamics of Irreversible Process, Springfield, Thomas, (1955)
- 25) de Groot, S. R., Mazur, P., Non-equilibrium Thermodynamics, North Holland, Amsterdam, (1962)
- 26) Krischer, O., Die Wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungs Technik, 2. Aufl., Springer V., (1963)
- 27) Krischer, O., Mahler, K., Über die Bestimmung des Diffusionswiderstandes und der Kapillaren Flüssigkeitsleitfähigkeit aus stationären und instationären Vorgängen, VDI-For. 473, (1959)
- 28) 桐栄, 林, 他 3 名, 粒粉体材料の減率乾燥期間の過程解析, 化学工学 23, (1959)
など
- 29) 桐栄, 林, 他 3 名, 粒体および粉体材料層の減率乾燥第 2 段の機構, 化学工学 28, (1964)
- 30) 桐栄, 林, 藤谷, 粒体および粉体材料層の減率乾燥速度解析, 化学工学 29, (1965)
- 31) Cary, J. W., Taylor, S. A., The Interaction of Simultaneous Diffusions of Heat and Water Vapor, Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 26, (1962)
- 32) Cary, J. W., Onsager's Relation and the Non-isothermal Diffusion of Water Vapor, J. Phys. Chem. 67, (1963)
- 33) Cary, J. W., An Evaporation Experiment and its Irreversible Thermodynamics, Int. Jou. Heat and Mass Tran. 7, (1964)

- 34) Cary, J. W., Tayler, S. A., Linear Equation in Porous Material under Temperature Gradient, Soil. Sci. Soc. America. Proc. 28, (1964)
- 35) Cassel, D. K., Nielsen, D. R., Soil Water Movement in Response to Imposed Temperature Gradient, Soil Sci. Soc. America. Proc. 33 (1969)
- 36) 松本, 前田, 結露蒸発の生じない場合の壁の吸放湿の基礎式について, 空気調和衛生工学会近畿支部環境工学委員会資料 11, (1967)
- 37) Novak, L. T., Coulman, G. A., Mathematical Method for the Drying of Rigid Porous Materials, Cana. J. Chemi. Engineering 53, (1975)
- 38) Matsumoto, M., Moisture through Porous Material, Report 52, 1, Div. of Build, Technology, Lund Inst. Technology, (1974)
- 39) 松本 衛, 結露蒸発のある壁体の熱水分移動の方程式とそれによる結露過程の計算, 日本建築学会環境工学第 6 回熱シンポジウム, 湿気, 6, (1976)
- 40) 銚井, 堀江, 池田, 多孔質材料の水分拡散係数について, 日本建築学会近畿支部研究報告集, (1977)
- 41) 文献 22) s 138
- 42) 桐栄, 林, 沢田, 藤谷, 粒体および粉体材料層の乾燥における液体水分移動率, 化学工学 29, (1965)
- 43) Jackson, R. D., Porosity and Soil-Water Diffusivity Relations, Soil Sci. Soc. America Proc. 27, (1963)
- 44) 棚沢 泰, 湿れる物質 (特に土砂) の熱常数測定法, 機械学会誌 35, (1931)
- 45) de Vries, D. A., Het Warmtegeleidingsvermogen van Grond, H. Veenman & Zonen-Wageningen, (1952)
- 46) 文献 26)
- 47) 倉前, 田中, 不飽和含水率における充填層内の液状水移動速度の解析, 化学工学論文集 1 (1975)
- 48) 倉前正志, 粒子層の毛管圧対含水率曲線の解析, 化学工学論文集 4, (1978)
- 49) 鈴木, 大谷, 粒子層内における 2 流体置換現象, 化学工学 37, (1973)
- 50) Laroussi, C., de Backer, L., Physical Interpretation of the Diffusion Equation Parameters According to Markov's Stochastic Processes Theory, Soil Sci. 120, (1975)
- 51) Penman, H. L., Gas and Vapour Movement in Soil, I. J. Agr. Sci. 30, (1940)
- 52) Krischer, O., Rohmalt, H., Wärmeleitung und Dampfdiffusion in feuchten Gutern, Verein.

- Deut. Ing. Forsch. 402, (1940)
- 53) van Bavel, Gaseous Diffusion and Porosity in Porous Media, Soil Sci. 73, (1952)
- 54) Rolling, R. L., Spangler, M. G., Movement of Soil Moisture under a Thermal Gradient,
Highway Res. Board Proc. 33, (1954)
- 55) Gurr, C. G., Marshall, T. J., Movement of Water in Soil due to a Temperature Gradient,
Soil Sci. 74 (1952)
- 56) Taylor, S. A., Cavazza, L., The Movement of Soil Moisture in Response to Temperature
Gradients, Soil Sci. Soc. Ameri. Proc. 18, (1954)
- 57) 文献 54)
- 58) 堀江, 池田, 温度勾配のある場合の片面断湿空隙材料内における水分蓄積について。
予備実験, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 計画系, (1972)
- 59) 堀江, 池田, 温度勾配のある場合の片面断湿空隙材料内における水分蓄積について。
その 1, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 計画系, (1973)
- 60) 堀江, 池田, 温度勾配のある場合の片面断湿空隙材料内における水分蓄積について。
その 2, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 計画系, (1974)
- 61) 堀江, 池田, 銚井, 湿度 100 % の空気と平衡する材料の含湿率推定法について。日本
建築学会近畿支部研究報告集, 計画系, (1974)
- 62) 堀江, 池田, 温度勾配のある場合の片面断湿空隙材料内における水分蓄積について。
その 3, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 計画系, (1975)
- 63) 堀江, 池田, 銚井, 乾燥過程における高湿度平衡含湿率推定法, 日本建築学会近畿支
部研究報告集, 計画系, (1975)
- 64) 池田, 堀江, 温度勾配のある場合の片面断湿空隙材料内における水分蓄積について。
その 4, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 計画系, (1976)
- 65) 銚井, 堀江, 池田, 多孔質材料の水分拡散係数, 日本建築学会近畿支部研究報告集,
計画系, (1976)
- 66) 池田哲朗, 従来の実用結露計算法, 日本建築学会環境工学委員会熱分科会第 6 回シ
ンポジウム, 湿気, (1976)
- 67) 池田, 堀江, 温度勾配のある場合の片面断湿空隙材料内における水分蓄積について。
その 5, 近似計算法, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 計画系,
(1977)
- 68) 池田, 堀江, 温度勾配のある場合の片面断湿空隙材料内における水分蓄積について。

結露－蒸発過程，日本建築学会大会学術講演梗概集，計画系，（1977）

- 69) 鉾井，堀江，池田， 多孔質材料の水分拡散係数とその液，蒸気成分への分離について。

日本建築学会大会学術講演梗概集，計画系，（1977）

- 70) 池田，堀江， 温度勾配のある場合の片面断湿空隙材料内における水分蓄積について。

結露過程における実験と熱・水分同時移動方程式の比較，日本建築学会
近畿支部研究報告集，計画系，（1978）

- 71) 鉾井，堀江，池田， 湿り材料の熱伝導率とその測定法について，日本建築学会近畿支
部研究報告集，計画系，（1978）

- 72) 池田，堀江， 温度勾配のある場合の片面断湿空隙材料内における水分蓄積について。

結露過程における実験と熱・水分同時移動方程式の比較。その2，日本
建築学会近畿支部研究報告集，計画系，（1979）

- 73) 鉾井，堀江，池田， 湿り材料の熱伝導率とその測定法について。周期的温度伝導率測
定法，日本建築学会近畿支部研究報告集，計画系，（1979）

- 74) 池田，堀江， 温度勾配のある場合の片面断湿空隙材料内における水分蓄積について。

近似計算法，日本建築学会大会学術講演梗概集，計画系，（1979）

謝

辞

私は、京都大学大学院入学後、結露問題を取扱う機会を与えて下さり、直接御指導、御鞭撻をいただいた京都大学名誉教授前田敏男先生に心から感謝の意を表します。

同時に、本研究遂行中、終始懇切な御指導と御配慮をいただき、研究をまとめることができました京都大学教授堀江悟郎先生に深く謝意を表します。

また、本研究中、終始適切な御教示をいただいた京都大学教授松浦邦男先生に深謝の意を表します。

私は、神戸大学在学中、神戸大学教授松本衛先生の御指導を受けた。まがりなりにも研究生生活が続けられたのは先生の研究に対する熱意を感じたためであると思います。また、本研究中、貴重な御助言とはげましを受けた。先生に厚く感謝いたします。

ゼミにおいて、また機会あるごとに適切なる御助言をいただいた京都大学助教授寺井俊夫先生、同、中村泰人先生に厚く感謝いたします。

また、研究上の問題等親しく聞いて下さった京都工芸繊維大学教授中沢康明先生に心から謝意を表します。

本研究についての議論に熱心に応じられ、問題点等を指摘して下さい下さった京都大学古江嘉弘講師に深謝の意を表します。

また、本研究において、熱心に議論をたたかわすことにより研究を深めることができ、さらに、終始労をいとわぬ協力をして下さった京都大学銚井修一助手に厚く感謝の意を表します。

最後に、京都大学環境工学研究室の皆様には種々御協力いただき感謝いたします。
なお、本研究の一部は文部省科学研究費の助成を受けた。ここに記して謝意を表します。

